



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚNIČ S VELMI NÍZKÝM VSTUPNÍM NAPĚTÍM

CONVERTER WITH VERY LOW INPUT VOLTAGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

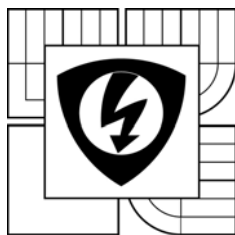
MICHAL JAŠKO

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HAVRÁNEK, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Michal Jaško

Ročník: 3

ID: 136529

Akademický rok: 2012/13

NÁZEV TÉMATU:

Měnič s velmi nízkým vstupním napětím

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Vypracujte přehled metod a komerčních obvodů určených pro transformaci nízkého napětí (50 - 200 mV) na úroveň vhodnou pro napájení nízkopříkonového mikrokontroleru.
- 2) V návaznosti na provedený průzkum navrhnete obvod pro transformaci optické energie přijaté fotodiodou na elektrickou energii s výstupním napětím dostatečným pro napájení digitálních obvodů (min. 2,5V). Pro návrh využijte vhodný měnič, např. z nabídek firem SEIKO nebo Linear Technology.
- 3) Ověřte základní parametry obvodu s měničem napájeným z laboratorního zdroje malého napětí (zejména účinnost a vliv velikosti výstupního odporu zdroje na funkci měniče).
- 4) Rozšiřte obvod o vhodnou fotodiodu s optickým konektorem, která bude ozařována laserovým paprskem z optického vlákna s připojenou laserovou diodou Siemens na vlnové délce 808 nm.
- 5) Ověřte funkci celé sestavy měniče buzeného optickým signálem z laserové diody. Vyhodnoťte celkovou účinnost obvodu a maximální zatížitelnost při použití jednoduché odporové zátěže.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Ultra-Low Voltage Operation Charge Pump IC for Step-up DC-DC Converter Startup S-882Z series, Rev.1.2 [online]. Japonsko: Seiko Instruments Inc., 2007, [cit. 2008-09-15]. Dostupný z WWW: <http://www.sii-ic.com/en/product1.jsp?subcatID=3&productID=1788>.
- [2] Další firemní literatura firmy Seiko a Linear Technology.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 27.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a testováním zvyšujícího měniče stejnosměrného napětí pro transformaci světelné energie přijaté fotodiodou na elektrickou energii s výstupním napětím dostatečným pro napájení digitálních obvodů.

Teoretická část utváří přehled komerčních obvodů a jsou v ní zvoleny obvody Linear Technology LTC3109 a kombinace Seiko S-822Z20 a S-8353D30MC jako vhodné pro další výzkum. Je popsán princip funkce těchto obvodů.

V praktické části jsou změřeny závislosti maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodů na vnitřním odporu zdroje. Na základě výsledků jsou porovnány vlastnosti obvodu Linear Technology s různými variantami vstupních transformátorů. Je navržen modifikovaný obvod Seiko s fotodiodou na vstupu a ověřena jeho funkce při napájení laserovou diodou po optickém vlákne.

Klíčová slova

Power harvesting, měnič napětí, DC-DC, nízkopříkonový, fotodioda, laserová dioda, optické vlákno, napájení fotodiodou, S882Z, S8353, LTC3109.

Abstract

This Bachelor's thesis describes a design and testing of an increasing direct voltage converter transforming light energy received by a photodiode to electrical energy with sufficient output voltage to power digital circuits.

The theoretical part forms an overview of commercial circuits and the Linear Technology LTC3109 and the combination of Seiko S-822Z20 and S-8353D30MC are chosen as suitable for the further research. The function principles of these circuits are described.

In the practical part the maximum output power and efficiency dependences on the internal resistance of the power source of the circuits are measured. Based on the results the characteristics of the Linear Technology circuit with different variants of the input transformers are compared. A modified Seiko circuit with an input photodiode is designed and its function is verified by laser diode powering through an optical fiber.

Keywords

Power harvesting, voltage converter, DC-DC, low-power, photodiode, laser diode, optical fiber, photodiode powering, S882Z, S8353, LTC3109.

Bibliografická citace:

JÁŠKO, M. *Měnič s velmi nízkým vstupním napětím*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *„Měnič s velmi nízkým vstupním napětím“* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24. května 2013

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 24. května 2013

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Integrované obvody pro transformaci napětí	9
2.1	EnOcean ECT 310 Perpetuum	9
2.2	Texas Instruments TPS61200	9
2.3	Linear Technology LTC3105, LTC3108, LTC3109.....	10
2.4	Seiko S-882Z a S-8353	10
3	Výběr obvodů vhodných pro napájení fotodiodou.....	11
3.1	Linear Technology LTC3109.....	11
3.2	Seiko S-822Z20 a S-8353D30MC	13
3.2.1	Seiko S-882Z20.....	13
3.2.2	Seiko S-8353D30MC	14
3.2.3	Realizovaný měnič Seiko	15
4	Ověření parametrů vybraných obvodů.....	17
4.1	Měnič s LTC3109	17
4.2	Měnič s S-822Z20 a S-8353D30MC.....	21
5	Modifikace obvodů	25
5.1	Modifikace obvodu s LTC3109	25
5.1.1	Výsledky měření na upraveném obvodu s LTC3109.....	27
5.2	Modifikace obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC	30
5.2.1	Měření na upraveném obvodu Seiko.....	32
5.2.2	Výsledky naměřené na upraveném obvodu Seiko	35
6	Závěr	37
	Seznam bibliografických citací	39
	Seznam obrázků	40
	Seznam tabulek	42
	Seznam příloh	42

1 ÚVOD

V současné době existuje množství elektronických obvodů určených k získávání elektrické energie z okolního prostředí (tzv. energy harvesting [1]) a vytvoření výstupního elektrického napětí dostatečného k napájení digitálních obvodů (např. měřicích obvodů s nízkopříkonovými mikrokontrolery).

Tato práce má za úkol provést průzkum trhu a nalézt takový obvod, s nímž by bylo možné realizovat napěťový měnič pro transformaci světelné energie přijaté fotodiodou na energii elektrickou s dostatečným výstupním napětím (min. 2,5 V). Výsledný měnič by měl splňovat nejen požadavky na cenu (výrazně nižší, než dostupná komerční řešení), což umožní právě použití některého z integrovaných obvodů ne přímo určených k tomuto účelu, ale především specifické požadavky dané použitím fotodiody jako zdroje elektrické energie.

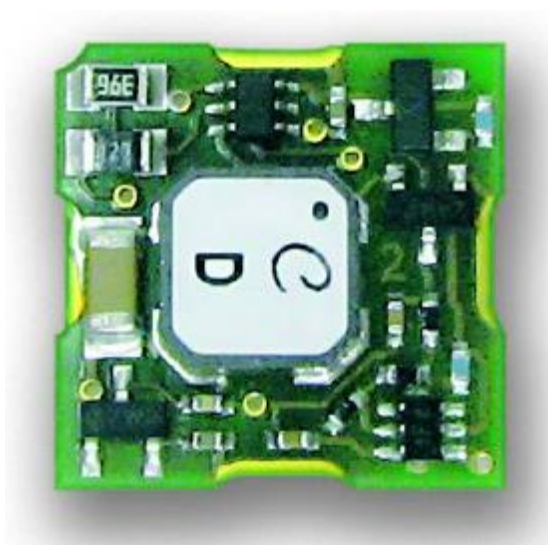
Z dostupných obvodů jsem nakonec zvolil dva (Linear Technology LTC3109 a kombinaci Seiko S-822Z20 a S-8353D30MC), na kterých jsem měřením ověřil schopnost funkce se zdrojem napětí s relativně velkým vnitřním odporem (desítky Ω). Na obou měničích jsem podle zadání ověřil závislost účinnosti a maximálního výstupního výkonu na velikosti vnitřního odporu zdroje.

Podle zjištěných skutečností jsem následně obvody upravil a v případě měniče Seiko ověřil funkci se skutečnou fotodiodou Tesla 3WN16620 osvětlovanou po optickém vlákne laserovou diodou Siemens SPL 2F81.

2 INTEGROVANÉ OBVODY PRO TRANSFORMACI NAPĚTÍ

Jedná se o obvody určené k transformaci velmi nízkých vstupních napětí (20 – 500 mV) na stabilizovaná napětí dostatečná pro napájení digitálních obvodů (2 – 5 V).

2.1 EnOcean ECT 310 Perpetuum



Obrázek 2.1 - ECT 310 Perpetuum [2]

ECT 310 je DC-DC konvertor pro bezbateriové napájení bezdrátových modulů EnOcean pomocí Peltierova článku přeměňujícího tepelnou energii na elektrickou. [2]

Vstupní napětí: 20 – 500 mV

Výstupní napětí: 3 – 5 V

Vnitřní impedance zdroje: $< 2 \Omega$

Účinnost: 30%

2.2 Texas Instruments TPS61200

Obvod je navržen pro napájení z NiCd, NiMH, Li-Ion, Li-polymer baterií a palivových nebo solárních článků. [3]

Vstupní napětí: 0,3 – 5,5 V (startovací napětí 0,5 V)

Výstupní napětí: 1,8 – 5,5 V

Účinnost: 90% (pro vstupní napětí $> 2,4$ V)

2.3 Linear Technology LTC3105, LTC3108, LTC3109

Linear Technology nabízí širokou řadu integrovaných obvodů pro energy harvesting přeměnou mechanické energie (vibrací), světla a tepelné energie. [4]

Tabulka 2.1 - Porovnání vlastností obvodů LTC [4]

	LTC3105	LTC3108	LTC3109
Vstupní napětí	0,25 – 5 V	20 – 500 mV	30 – 500 mV
Výstupní napětí	1,5 – 5,25 V	2,35; 3,3; 4,1; 5 V	2,35; 3,3; 4,1; 5 V
Výstupní proud	6 – 12 mA	2,8 – 7 mA	6 – 26 mA
Auto polarita	ne	ne	ano

2.4 Seiko S-882Z a S-8353

Seiko S-882Z je nízkonapěťová nábojová pumpa, která se používá jako startovací obvod pro DC-DC měnič Seiko S-8353 (nebo jiný). Tyto dva integrované obvody tvoří společně velmi zajímavé řešení pro získávání elektrické energie zejména přeměnou tepelné.

Vlastnosti S-882Z [5]

Vstupní napětí: 0,3 – 3 V
Spotřeba během provozu: 0,5 mA max. (pro $U_{IN} = 0,3$ V)
Spotřeba ve vypnutém stavu: 0,6 μ A max. (pro $U_{IN} = 0,3$ V)
Počáteční vybíjecí napětí: 1,8 – 2,4 V po 0,2 V (2,0 V pro S-882Z20)
Vypínací napětí: vybíjecí napětí + 0,1 V (2,1 V pro S-882Z20)

Vlastnosti S-8353 [6]

Výstupní napětí: 1,5 – 6,5 V po 0,1 V
(3,0 V \pm 2,4% fixní pro S-8353D30MC)
Provozní vstupní napětí: 0,9 V min. ($I_{OUT} = 1$ mA)
Spotřeba během provozu: 18,7 μ A ($U_{OUT} = 3,3$ V)
Spotřeba ve vypnutém stavu: 0,5 μ A max.
Střída PWM: 15 – 83%

3 VÝBĚR OBVODŮ VHODNÝCH PRO NAPÁJENÍ FOTODIODOU

Vzhledem k tomu, že se v této práci snažíme nalézt obvod vhodný pro transformaci světelné energie přijaté fotodiodou na energii elektrickou, musí hledaný obvod splňovat specifické, pro podobné obvody poněkud netypické, požadavky. Proud z fotodiody vytvoří na zátěži úbytek napětí v rozmezí 0,3 až 0,6 V, což je dostatečná hodnota pro všechny obvody uvedené v kapitole 2. Obvody LTC3108 a LTC3109 například dokáží pracovat už se vstupním napětím 20 mV, resp. 30 mV, to ale pro naše potřeby není rozhodující. Standardní hodnoty vstupních napětí pohybující se okolo 0,3 V jsou pro nás naprosto dostatečné, musíme se ale zaměřit na jiné parametry.

Fotodioda se chová jako velmi měkký zdroj napětí s vnitřním odporem minimálně 20 Ω . [7] Většina integrovaných obvodů pro energy harvesting je ale navržena pro práci se zdrojem, který má výrazně nižší vnitřní odpor, často menší než 2 Ω . Proto se tyto obvody obvykle používají společně s Peltierovými články, které tento požadavek splňují. Pokusíme se nalézt takový měnič napětí, který by dokázal pracovat s fotodiodou přesto, že k tomu není přímo určený.

Při ověřování obvodů budeme striktně dodržovat maximální napájecí napětí 0,6 V a obvody budeme posuzovat podle toho, zda dokáží pracovat se zdrojem s vnitřním odporem minimálně 20 Ω .

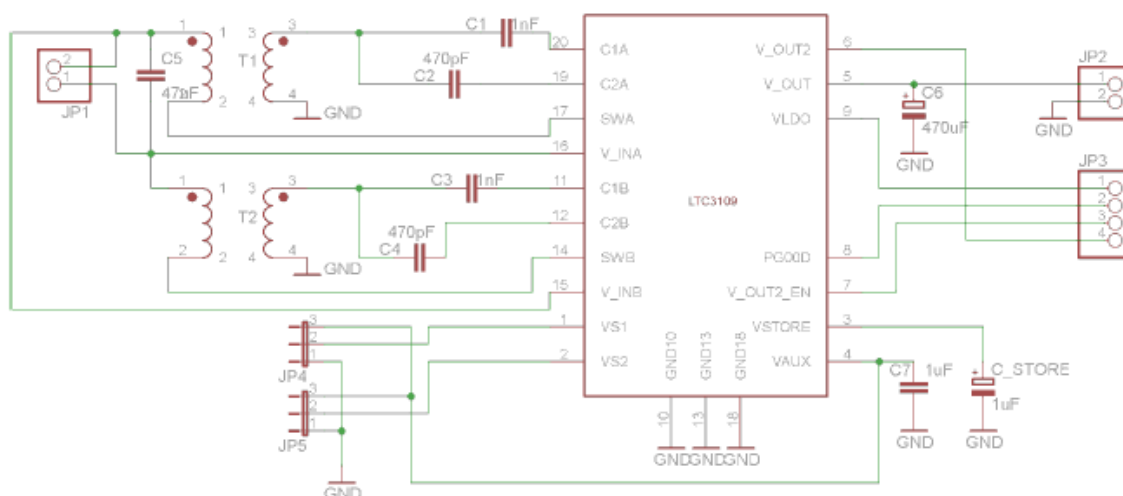
Z obvodů uvedených v kapitole 2 jsem pro měření zvolil Linear Technology LTC3109 a kombinaci Seiko S-822Z20 a S-8353D30MC. Oba měniče již byly na fakultě k dispozici realizovány na DPS. Jedná se o poměrně rozdílná řešení, proto bude v této kapitole podrobněji popsán princip funkce obou měničů.

3.1 Linear Technology LTC3109

Obvod LTC3109 používá na vstupu transformátory (v tomto případě s poměrem 1:100) a umožňuje práci už od 30 mV s automatickou volbou polarity vstupního napětí. Pro měření jsem použil desku navrženou podle dokumentace s drobnými úpravami.

Byl přidán vstupní konektor JP1 pro připojení zdroje napětí a výstupní konektor JP2 pro připojení zátěže. Pro jednoduchou změnu požadovaného výstupního napětí byly přidány zkratovací propojky JP4 a JP5. Pomocí JP4 přivádíme na VS1 buď nulové nebo kladné napětí z výstupu IO označeného VAUX. JP5 přivádí napětí na vstup VS2. Dále byl přidán konektor JP3, na který jsou vyvedeny zbývající signály LTC3109. [8]

LTC3109	– integrovaný obvod
T1, T2	– transformátory 1:100 LPR6235-752SML
C1,C3	– keramické kondenzátory 1nF
C2,C4	– keramické kondenzátory 470nF
C5	– keramické kondenzátory 47nF
C6	– tantalový kondenzátor 470μF
C7	– keramické kondenzátory 1μF
C_STORE	– tantalový kondenzátor 470μF



Obrázek 3.2 - DPS měniče s LTC3109 [8]



Obrázek 3.3 - Podoba realizovaného měniče s LTC3109

3.2 Seiko S-822Z20 a S-8353D30MC

Klíčovými prvky výsledného obvodu jsou nábojová pumpa S-882Z20 a zvyšující DC-DC měnič S-8353D30MC.

3.2.1 Seiko S-882Z20

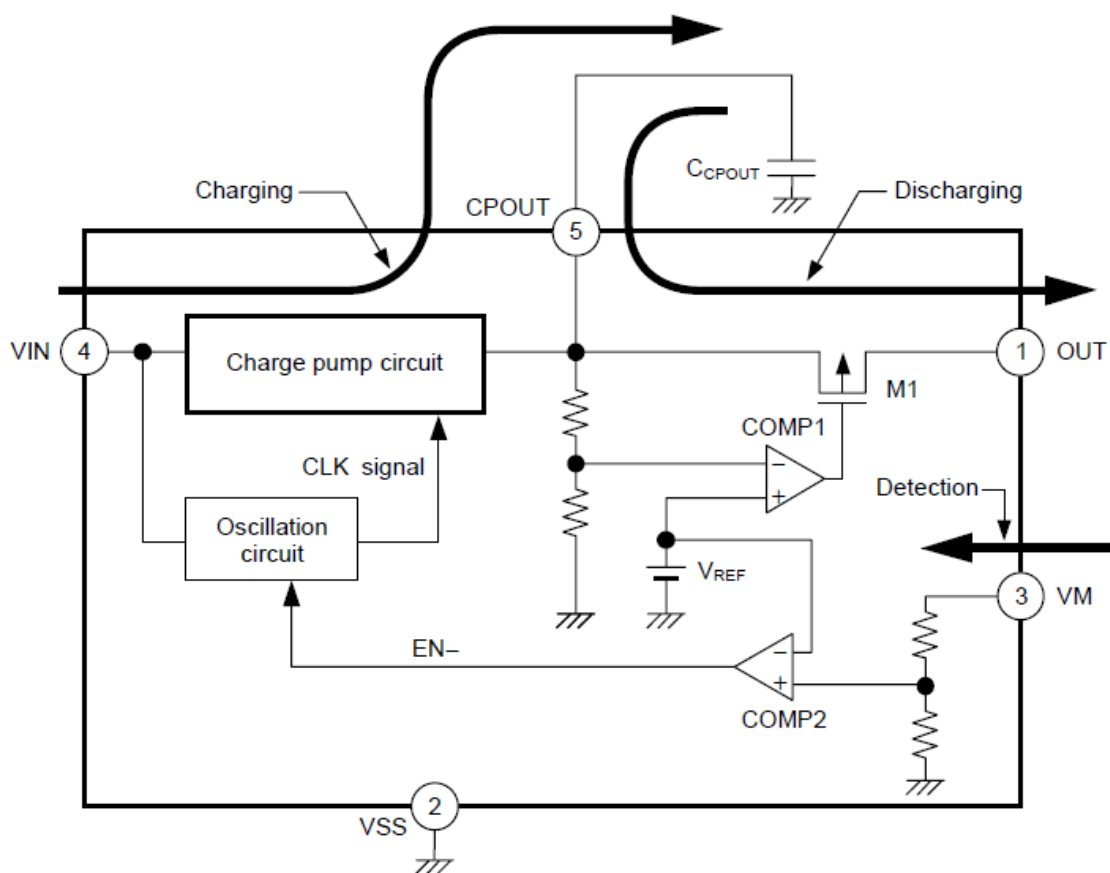
Integrovaný obvod Seiko S-882Z20 je nejdůležitějším prvkem DC-DC měniče. Je to nábojová pumpa pro navazující zvyšující napěťový měnič S-8353D30MC, která se liší od konvenčních integrovaných obvodů v tom, že plně využívá SOI (Silicon on insulator) technologii, jež umožňuje extra nízkonapěťový provoz. Je schopen zvýšit napětí už od velikosti 0,3 - 0,35 V.

Načerpaná energie je uložena v externím startovacím kondenzátoru. Ten je po dosažení určitého náboje vybíjen a jeho energie slouží k nastartování chodu DC-DC měniče. Kromě toho je zkonstruován tak, aby se automaticky zastavil jeho provoz. K jeho zastavení dochází, když už napěťový měnič na svém výstupu produkuje napětí nad zadanou hodnotu. Tím lze dosáhnout významné úspory energie. [9]

Princip funkce je zobrazen na obrázku 3.4: [5]

1. Po přivedení napětí o minimální velikosti 0,3 V na vstup obvodu VIN, začne oscilační obvod generovat pulsy (signál CLK).
2. Obvod nábojové pumpy je řízen signálem CLK a vstupní napětí VIN je zvýšeno na požadovanou hodnotu
3. Zvýšené výstupní napětí z nábojové pumpy nabíjí kondenzátor C_{CPOUT} .
4. Po dosažení požadované hodnoty napětí na CPOUT (je dána výrobcem a obsažena v názvu součástky - v našem případě S-882Z20, tedy 2,0 V) se přepne komparátor COMP1 a dojde k sepnutí M1.

5. Sepnutím M1 dochází k vybíjení kondenzátoru CPOUT přes výstupní pin OUT.
6. V případě, že VCPOUT klesne na úroveň VCPOUT2 v důsledku vybití, M1 se rozpojí a vybíjení je zastaveno.
7. Po dosažení požadované hodnoty V_{OFF} (v našem případě 2,1 V) na pinu VM dojde k překlopení komparátoru COMP2, oscilátor přestane generovat pulsy a dojde k vypnutí obvodu.
8. Jestliže napětí na pinu VM nedosáhne požadované nebo vyšší hodnoty, obvod neustále nabíjí kondenzátor C_{CPOUT} .



Obrázek 3.4 - Vnitřní schéma integrovaného obvodu Seiko S-882Z20 [5].

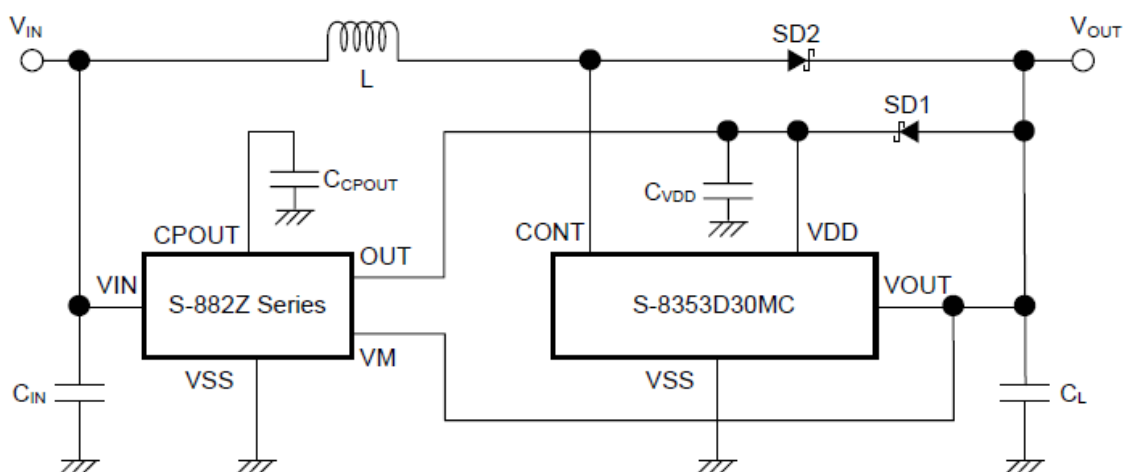
3.2.2 Seiko S-8353D30MC

Integrovaný obvod Seiko S-8353D30MC je zvyšující DC-DC měnič napětí používající pulzně šířkovou modulaci (PWM - Pulse Width Modulation). Externími součástkami IO jsou cívka, kondenzátor a dioda. V první části spínacího cyklu se energie ukládá do magnetického pole cívky a zátěž je napájena pouze z energie výstupního kondenzátoru

a v druhé části spínacího cyklu je touto energií napájena zátěž a dobíjen výstupní kondenzátor. [9]

3.2.3 Realizovaný měnič Seiko

„DC/DC měnič byl navrhnout na základě příkladu aplikačního obvodu z katalogového listu k integrovanému obvodu Seiko S-882Z20. [5] Svými parametry $U_{in} = 0,3V$ (vstupní napětí), $U_{out} = 3,0V$ (výstupní napětí) a $I_{out} = 1mA$ (výstupní proud) plně odpovídá potřebám zadání a není nutné jej nikterak dále upravovat.“ [9]



Obrázek 3.5 - Schéma zapojení měniče napětí Seiko [5]

Tabulka 3.1 - Použité součástky - měnič Seiko [9]

Jméno součástky	Symbol	Výrobce	Hodnota (typ)
S-882Z Series	-	Seiko Instruments Inc.	S-882Z20-M5V1G (hodnota počátečního vybíjecího napětí: 2,0V)
Zvyšující DC/DC měnič	-	Seiko Instruments Inc.	S-8353D30MC (výstupní napětí: 3,0 V)
Tlumivka	L	ECM Electronics	CDRH5D18-101 (100 μH)
Schottkyho dioda	SD1,SD2	Rohm Co.,Ltd.	RB551V-30
Startující kondenzátor	C _{CPOUT}	-	10 μF (keramický)
Vstupní kondenzátor	C _{IN}	-	47 μF
Výstupní kondenzátor	C _L	-	33 μF (ESR > 50 m Ω)
Vyhlazovací kondenzátor	C _{VDD}	-	1 μF (keramický)

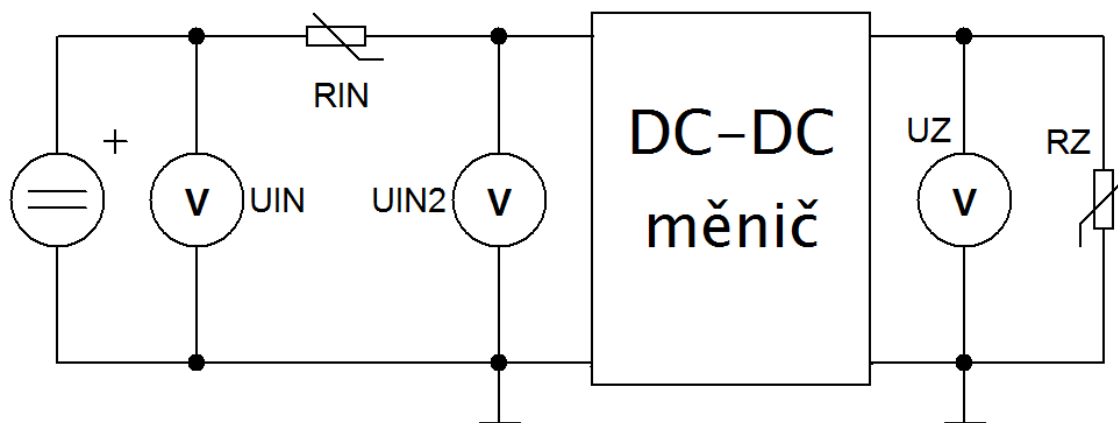


Obrázek 3.6 - Podoba realizovaného měniče Seiko [9]

4 OVĚŘENÍ PARAMETRŮ VYBRANÝCH OBVODŮ

Abych ověřil schopnost měniče pracovat s fotodiodou jako zdrojem energie, simuloval jsem její vnitřní odpor odporovou dekadou zapojenou do série se zdrojem napětí na vstupu měniče. Na výstup měniče jsem připojoval různé zátěže simulované odporovou dekadou, na napájecím zdroji nastavoval různá napětí do maximálně 600 mV a zjišťoval, pro jaké vnitřní odpory zdroje dokáže testovaný měnič udržet na svém výstupu maximální napětí.

Vzhledem k rozdílným vlastnostem a principu funkce měničů se mírně lišily i způsoby měření měničů Linear Technology a Seiko. Zapojení uvedené na obrázku 4.1 bylo pro oba měniče stejné.



Obrázek 4.1 - Schéma zapojení DC-DC měničů při měření závislosti

4.1 Měnič s LTC3109

V tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty závislosti výstupního napětí obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje. Vliv měřicích přístrojů na měřené hodnoty byl zanedbán.

Je-li uvedeno nulové výstupní napětí, znamená to, že výstupní napětí při daném nastavení klesalo. Není už ale zjištěno, zda klesne úplně na nulu, nebo na jinou (pro praxi nezajímavou) hodnotu. Takové přesné měření by bylo velmi časově náročné. Obdobně ostatní hodnoty - je-li uvedeno např. 3,5 V, znamená to, že při daném nastavení hodnota vystoupala nad 3,5 V, není už ale zjištěno na jakou hodnotu přesně (opět časově náročné - výstupní napětí stoupalo příliš pomalu). Dá se ale předpokládat, že na maximální dosažitelnou hodnotu 4,97 V by napětí nevystoupalo. Tyto hodnoty stabilního maximálního napětí na výstupu jsou v tabulkách označeny zeleně.

Z naměřených hodnot jsem dopočítal závislosti maximálního výstupního výkonu na vnitřním odporu zdroje podle rovnice

$$P_Z = \frac{U_Z^2}{R_Z} \quad [\text{W}] \quad \text{rov. (1)}$$

a závislosti účinnosti obvodu na vnitřním odporu zdroje podle rovnice

$$\eta = \frac{P_Z}{P_{IN}} * 100 \quad [\%] \quad \text{rov. (2)}$$

kde

$$P_{IN} = U_{IN2} * \frac{U_{IN} - U_{IN2}}{R_{IN}} \quad [\text{W}] \quad \text{rov. (3)}$$

Použité přístroje:

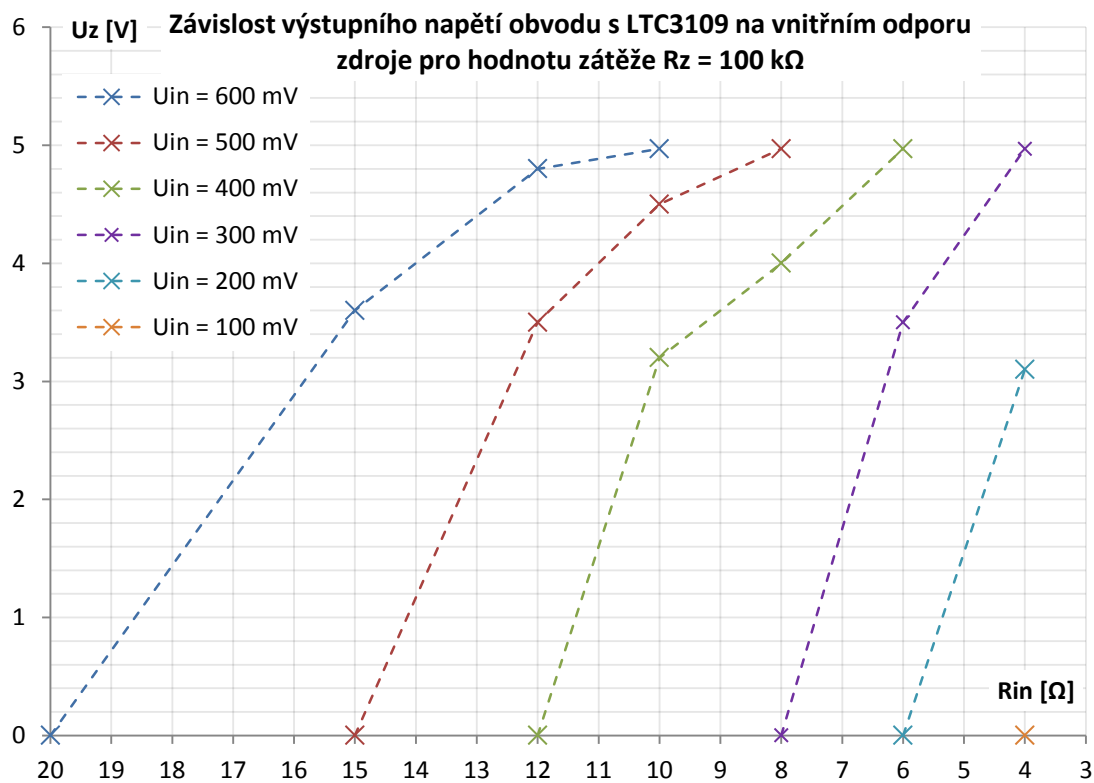
Stejnoseměrný zdroj napětí	Agilent E3631A
Voltmetr U _{IN}	Agilent 34410A
Voltmetr U _{IN2}	Agilent 34410A
Voltmetr U _Z	Agilent 34401A
Odporová dekáda R _{IN}	Metra L110 - 9109322
Odporová dekáda R _Z	Metra L110 - 8420109

Následující tabulka obsahuje hodnoty naměřené pro $R_Z = 100 \text{ k}\Omega$. Pro ně jsou zobrazeny grafy závislostí výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje.

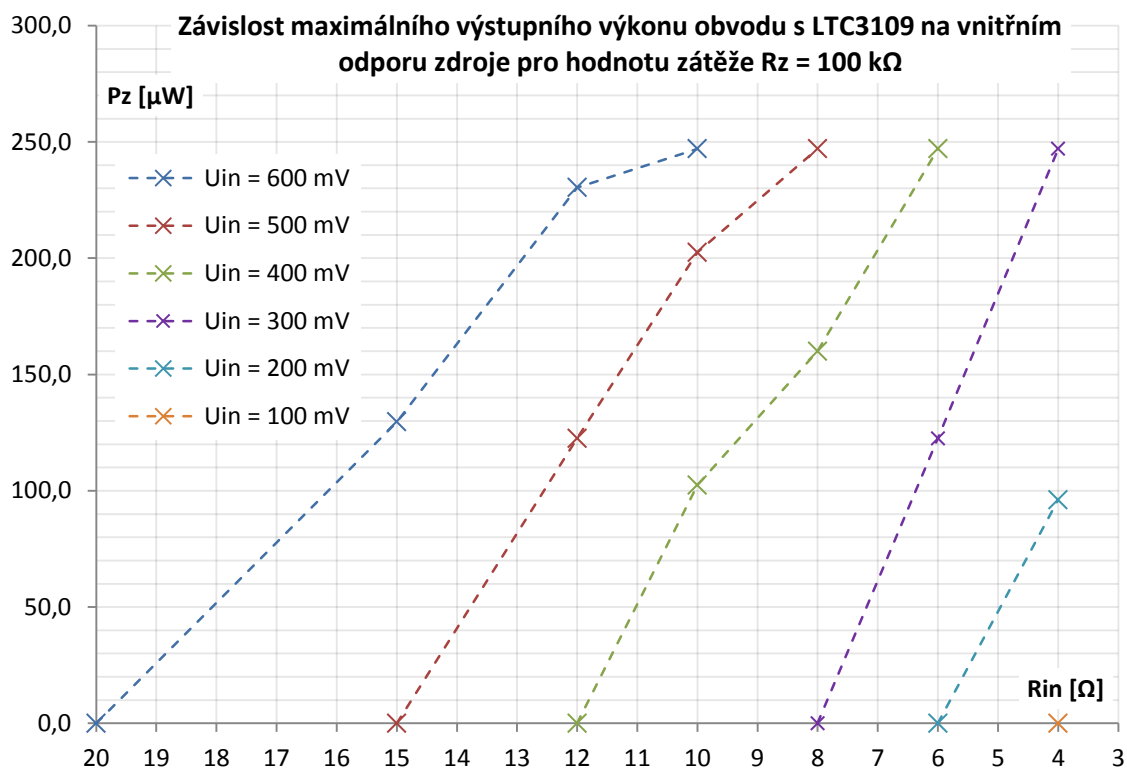
Tabulky hodnot a příslušné grafy pro ostatní hodnoty zátěže jsou uvedeny v příloze.

Tabulka 4.1 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100\text{ k}\Omega$

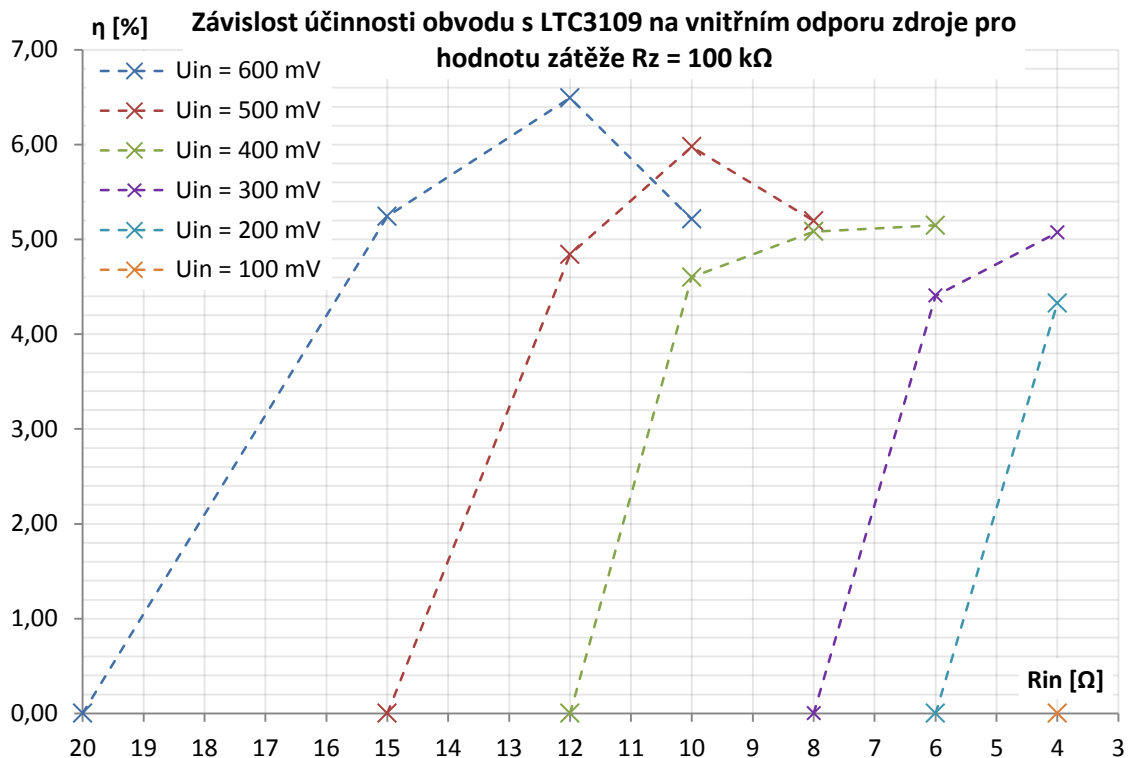
$R_z = 100\text{ k}\Omega$					
$U_{IN} [\text{mV}]$	$R_{IN} [\Omega]$	$U_{IN2} [\text{mV}]$	$U_z [\text{V}]$	$P_z [\mu\text{W}]$	$\eta [\%]$
600,6	20	57,8	0	0,0	0,00
600,4	15	69,9	3,6	129,6	5,24
600,3	12	82,2	4,8	230,4	6,49
600,1	10	93,5	4,97	247,0	5,21
500,8	15	60,0	0	0,0	0,00
500,7	12	70,6	3,5	122,5	4,84
500,5	10	80,7	4,5	202,5	5,98
500,3	8	93,5	4,97	247,0	5,20
400,8	12	58,6	0	0,0	0,00
400,8	10	66,6	3,2	102,4	4,60
400,6	8	78,1	4	160,0	5,08
400,3	6	94,0	4,97	247,0	5,15
300,1	8	60,9	0	0,0	0,00
300,0	6	73,7	3,5	122,5	4,41
300,5	4	94,6	4,97	247,0	5,07
200,3	6	52,2	0	0,0	0,00
200,2	4	66,4	3,1	96,1	4,33
100,9	4	37,8	0	0,0	0,00



Obrázek 4.2 - Závislost výstupního napětí obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100\text{ k}\Omega$



Obrázek 4.3 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100\text{ k}\Omega$



Obrázek 4.4 - Závislost účinnosti obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100 \text{ k}\Omega$

4.2 Měnič s S-822Z20 a S-8353D30MC

V tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty závislosti výstupního napětí obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje. Vliv měřicích přístrojů na měřené hodnoty byl zanedbán.

Je-li uvedeno nulové napětí na výstupu měniče, znamená to, že při daném nastavení nebylo napětí stabilní - obvod ho obvykle dokázal udržet pouze po zlomek sekundy (viz princip funkce nábojové pumpy v kapitole 3.2.1). Další naměřené hodnoty výstupního napětí již vždy stabilní byly. Maximální dosažitelná hodnota výstupního napětí byla 3,020 V. V tabulkách jsou označeny zeleně hodnoty, při kterých bylo dosaženo maximálního výstupního napětí při vnitřním odporu zdroje minimálně 20Ω - tedy hodnoty, které nás zajímají především.

Z naměřených hodnot jsem dopočítal závislosti maximálního výstupního výkonu na vnitřním odporu zdroje podle rovnice 1 a závislosti účinnosti obvodu na vnitřním odporu zdroje podle rovnice 2.

Použité přístroje:

Stejnoseměrný zdroj napětí Agilent E3631A

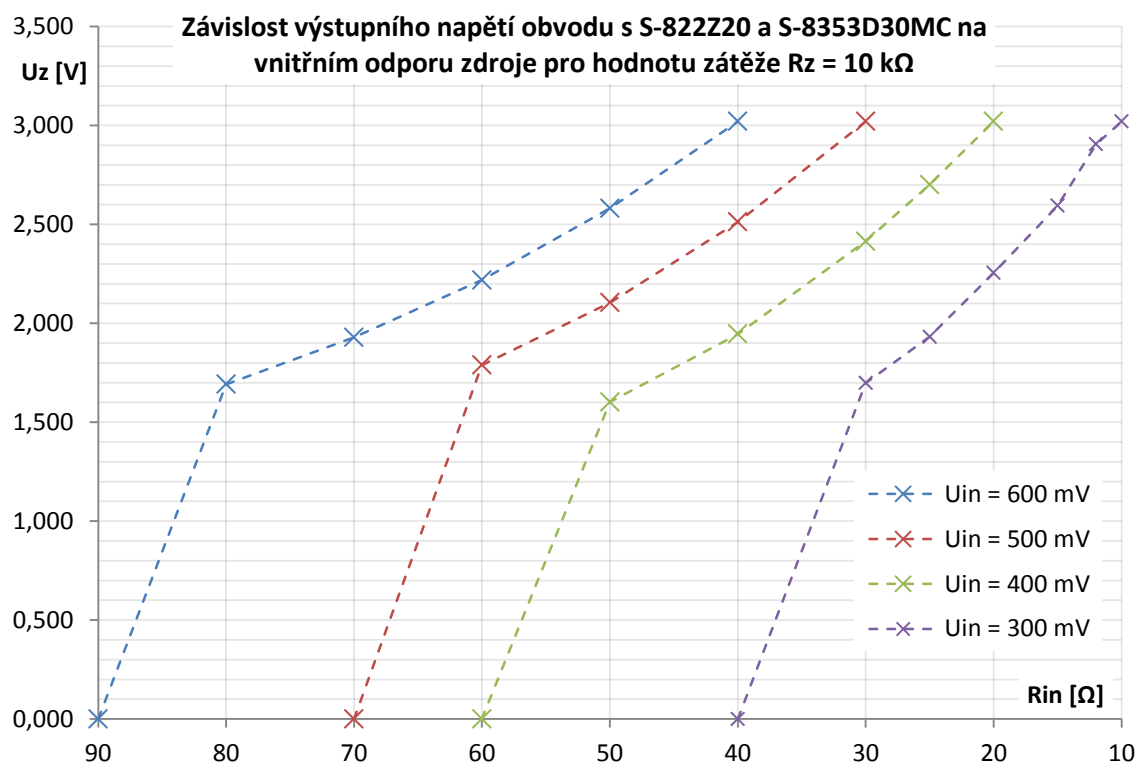
Voltmetr UIN	UNI-T UT804
Voltmetr UIN2	HP 34401A
Voltmetr UZ	Agilent 34410A
Odporová dekáda RIN	Metra XL6 - 4370200067
Odporová dekáda RZ	Metra XL6 – 4370200072

Následující tabulka obsahuje hodnoty naměřené pro $R_z = 10\text{ k}\Omega$. Pro ně jsou zobrazeny grafy závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje.

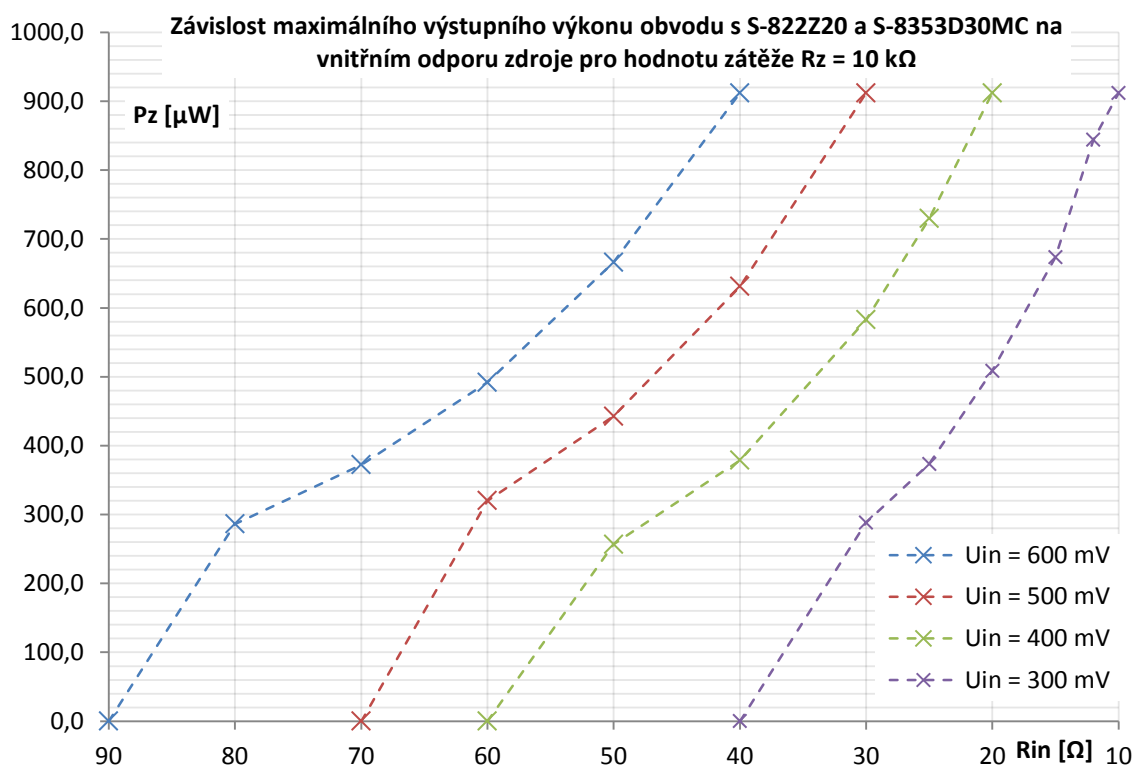
Tabulky hodnot a příslušné grafy pro ostatní hodnoty zátěže jsou uvedeny v příloze.

Tabulka 4.2 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$

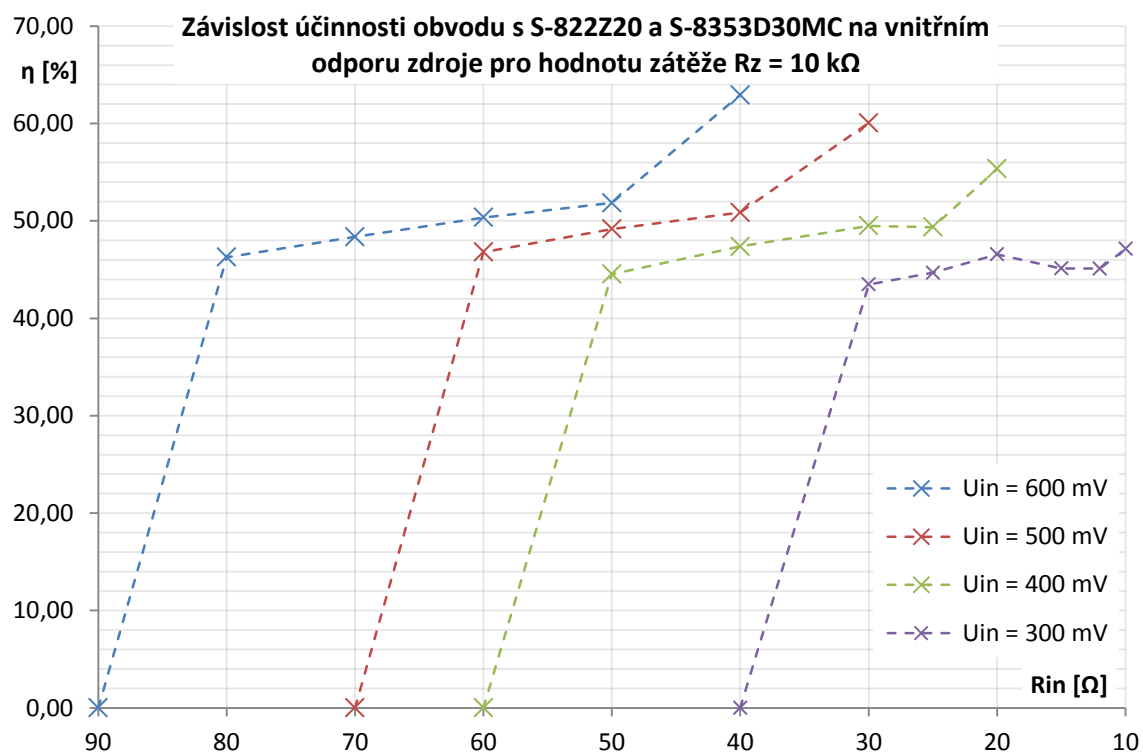
$R_z = 10\text{ k}\Omega$					
U_{IN} [mV]	R_{IN} [Ω]	U_{INz} [mV]	U_z [V]	P_z [μW]	η [%]
300,0	40	-	0,000	0,0	0,00
300,0	30	98,9	1,698	288,3	43,49
300,0	25	109,8	1,932	373,3	44,68
299,9	20	124,5	2,255	508,5	46,58
299,9	15	140,1	2,595	673,4	45,12
299,8	12	154,4	2,905	843,9	45,11
300,0	10	206,1	3,020	912,0	47,13
400,0	60	-	0,000	0,0	0,00
400,0	50	94,2	1,602	256,6	44,54
399,9	40	110,4	1,946	378,7	47,38
399,9	30	131,7	2,414	582,7	49,49
399,9	25	144,9	2,701	729,5	49,36
400,0	20	283,9	3,020	912,0	55,34
500,7	70	-	0,000	0,0	0,00
500,7	60	103,2	1,789	320,1	46,81
500,6	50	117,5	2,104	442,7	49,17
500,6	40	136,2	2,512	631,0	50,85
500,7	30	381,2	3,020	912,0	60,06
600,5	90	-	0,000	0,0	0,00
600,5	80	98,6	1,692	286,3	46,28
600,5	70	109,7	1,929	372,1	48,37
600,4	60	122,7	2,218	492,0	50,36
600,2	50	139,4	2,581	666,2	51,85
600,5	40	479,6	3,020	912,0	62,92



Obrázek 4.5 - Závislost výstupního napětí obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$



Obrázek 4.6 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$



Obrázek 4.7 - Závislost účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$

5 MODIFIKACE OBVODŮ

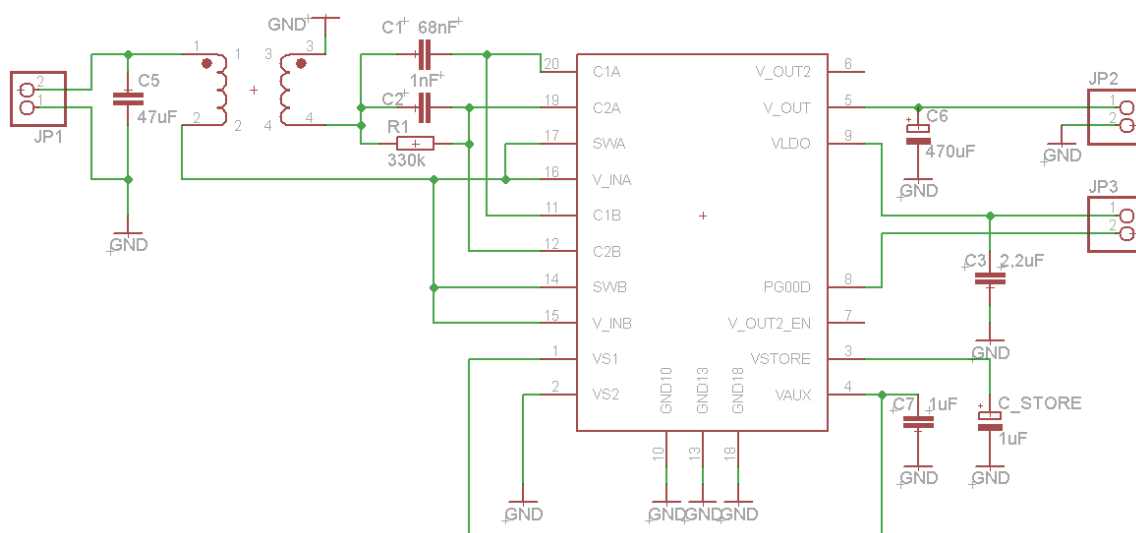
Na základě naměřených výsledků jsem provedl úpravy obou měničů a znovu proměřil jejich vlastnosti. Provedené změny byly u každého měniče odlišné a budou podrobně popsány v následujících podkapitolách.

5.1 Modifikace obvodu s LTC3109

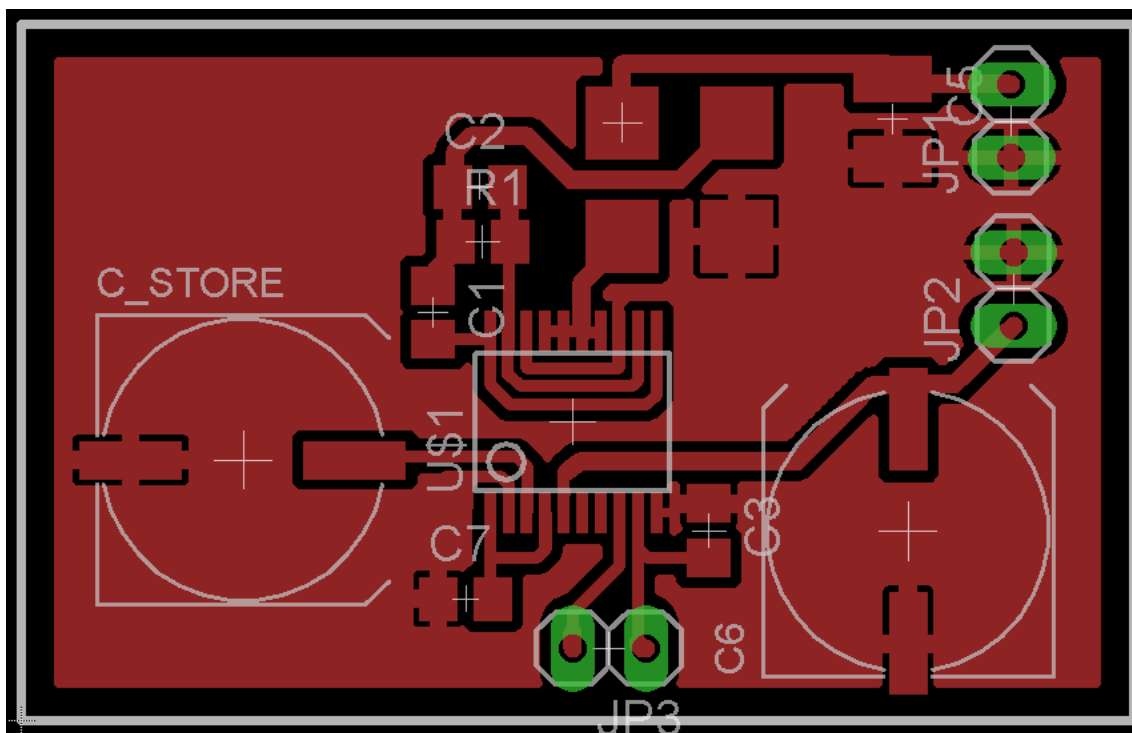
Z výsledků naměřených na obvodu s LTC3109 je zřejmé, že obvod v dané konfiguraci sice dokáže vytvořit na výstupu stabilní napětí 5 V už z velmi malých vstupních napětí (pod 100 mV), ale nedokáže pracovat s vnitřním odporem zdroje v řádu desítek Ω . Pro zátěž 100 k Ω (tabulka 4.1) dokáže pracovat s vnitřním odporem zdroje 10 Ω , pro zátěž 10 k Ω (příloha 1, tabulka 4) je už i vnitřní odpor zdroje 3 Ω příliš velký. Naměřená účinnost obvodu byla také velmi nízká, pohybovala se v jednotkách procent. Nejvyšší účinnosti 6,55% bylo dosaženo při $U_{IN} = 500,0$ mV; $R_{IN} = 6$ Ω ; $R_Z = 50$ k Ω ; $U_Z = 4,9$ V (příloha 1, tabulka 2).

Měnič v dané konfiguraci tedy nesplňuje potřebné požadavky. Je navržen pro získávání energie z Peltierových článků, které mají nízký vnitřní odpor. Jako možné řešení se nabízí použití vstupních transformátorů s jiným poměrem než 1:100.

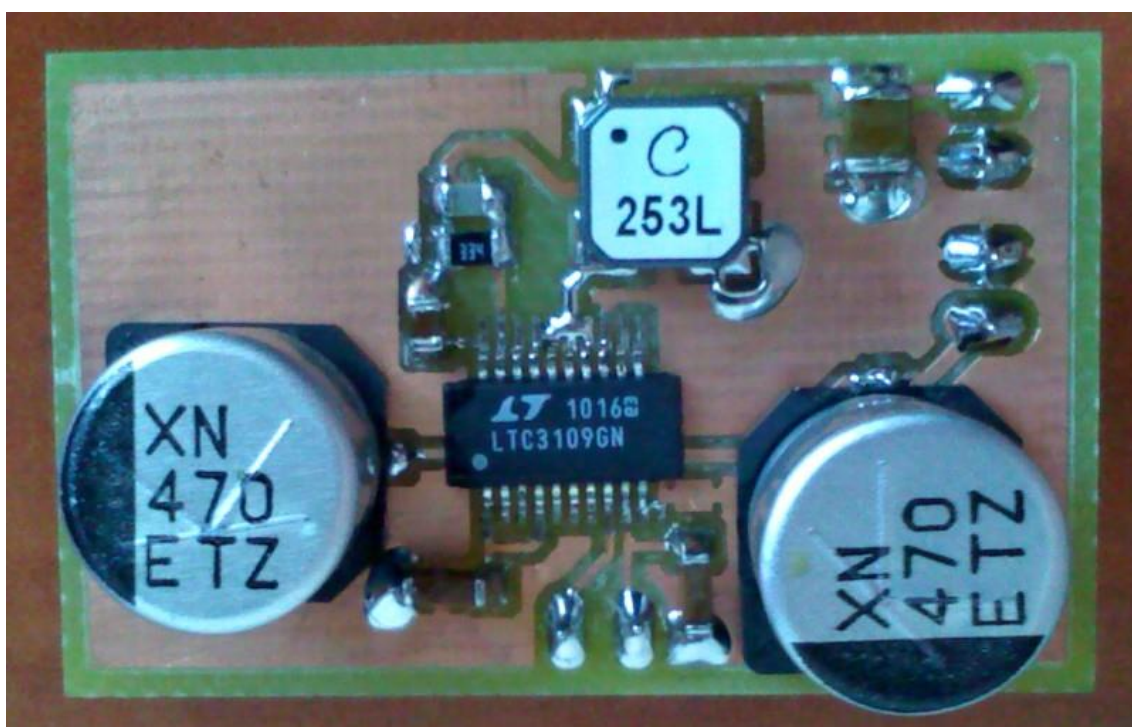
Na nově navrženém obvodu v unipolárním zapojení jsem provedl obdobná měření jako v kapitole 4.1, tentokrát ale postupně se vstupním transformátorem v poměru 1:10, 1:20 a 1:50. Na následujících obrázcích je vidět nově vytvořený obvod. Maximální výstupní napětí měniče bylo nastaveno na 3,3 V. Tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze.



Obrázek 5.1 - Unipolární zapojení měniče s LTC3109



Obrázek 5.2 - DPS upraveného měniče s LTC3109

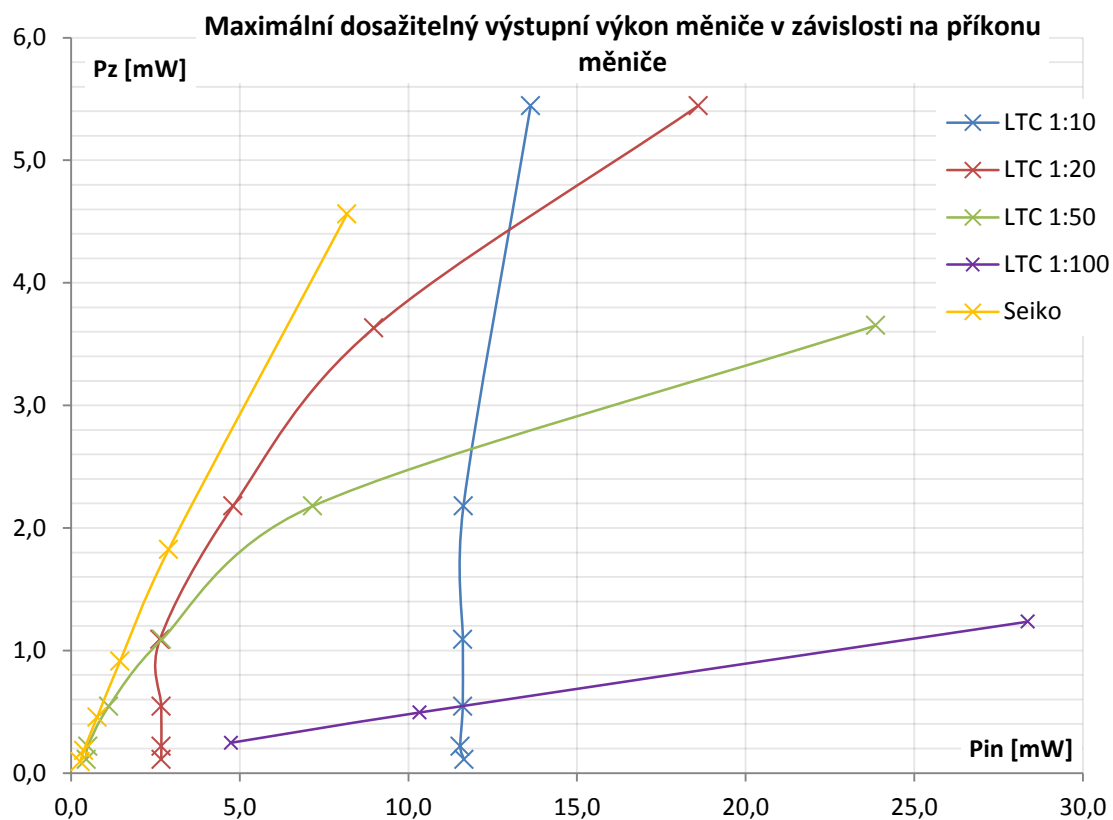


Obrázek 5.3 - Výsledná podoba upraveného měniče s LTC3109

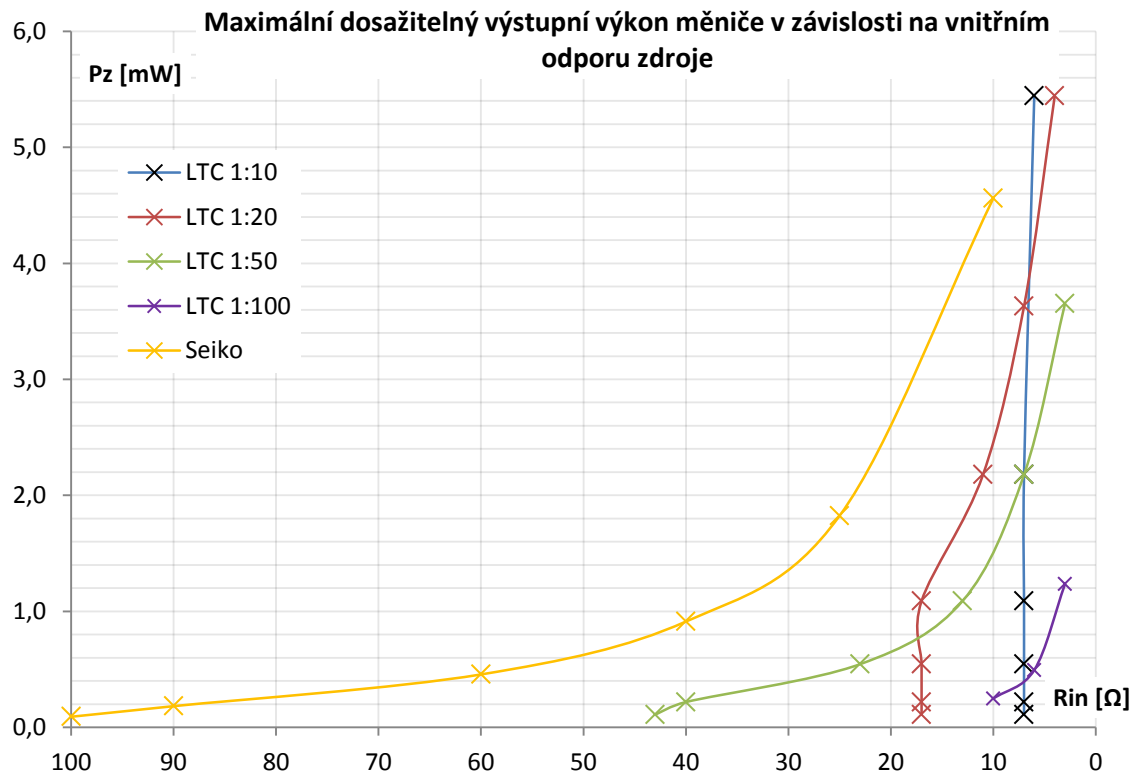
5.1.1 Výsledky měření na upraveném obvodu s LTC3109

Následující grafy porovnávají vlastnosti všech testovaných variant DC-DC měničů – LTC3109 se vstupními transformátory v poměrech 1:10, 1:20, 1:50, 1:100 a měnič Seiko S-822Z20 + S-8353D30MC. Jsou uvažovány naměřené hodnoty z kapitol 4.1, 4.2 a 5.1.

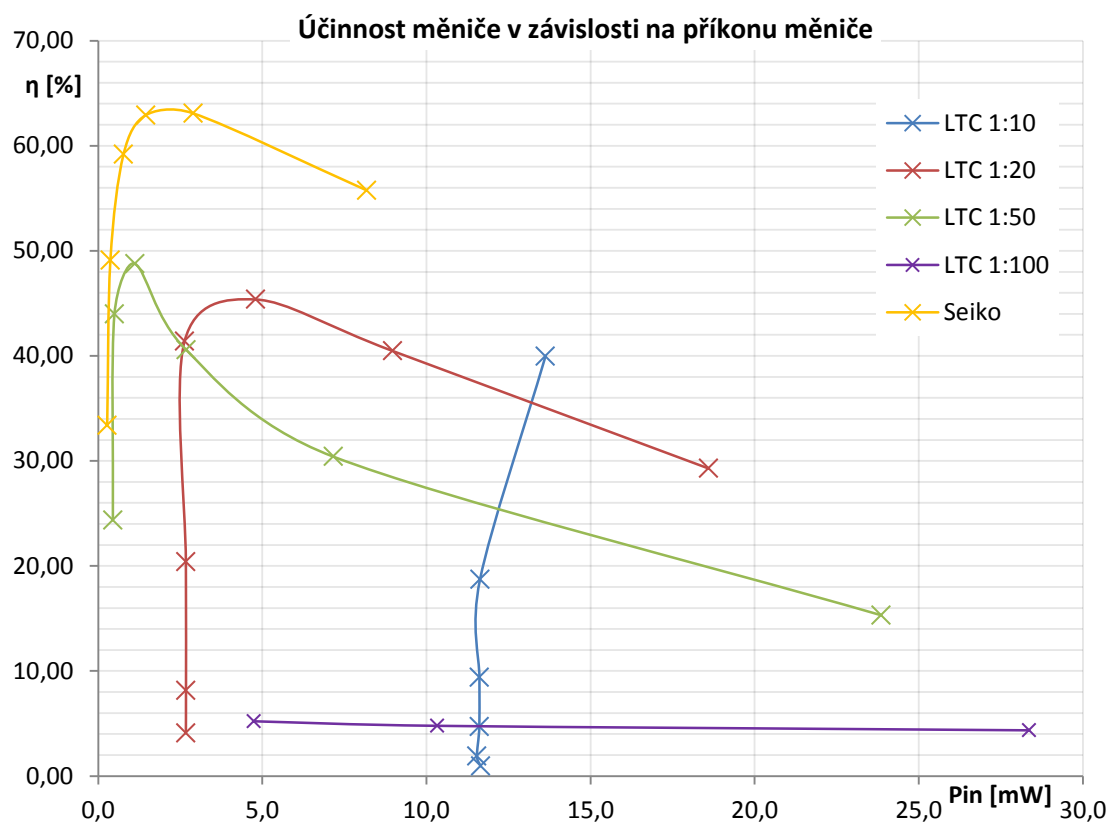
Grafy zobrazují závislosti maximálního dosažitelného výkonu na výstupu měniče a účinnosti měniče na příkonu měniče a vnitřním odporu zdroje. Hodnoty zobrazené v grafech byly získány při napájecím napětí zdroje 600 mV a při maximálním napětí na výstupu měniče. V tabulkách jsou tyto hodnoty označeny zeleně.



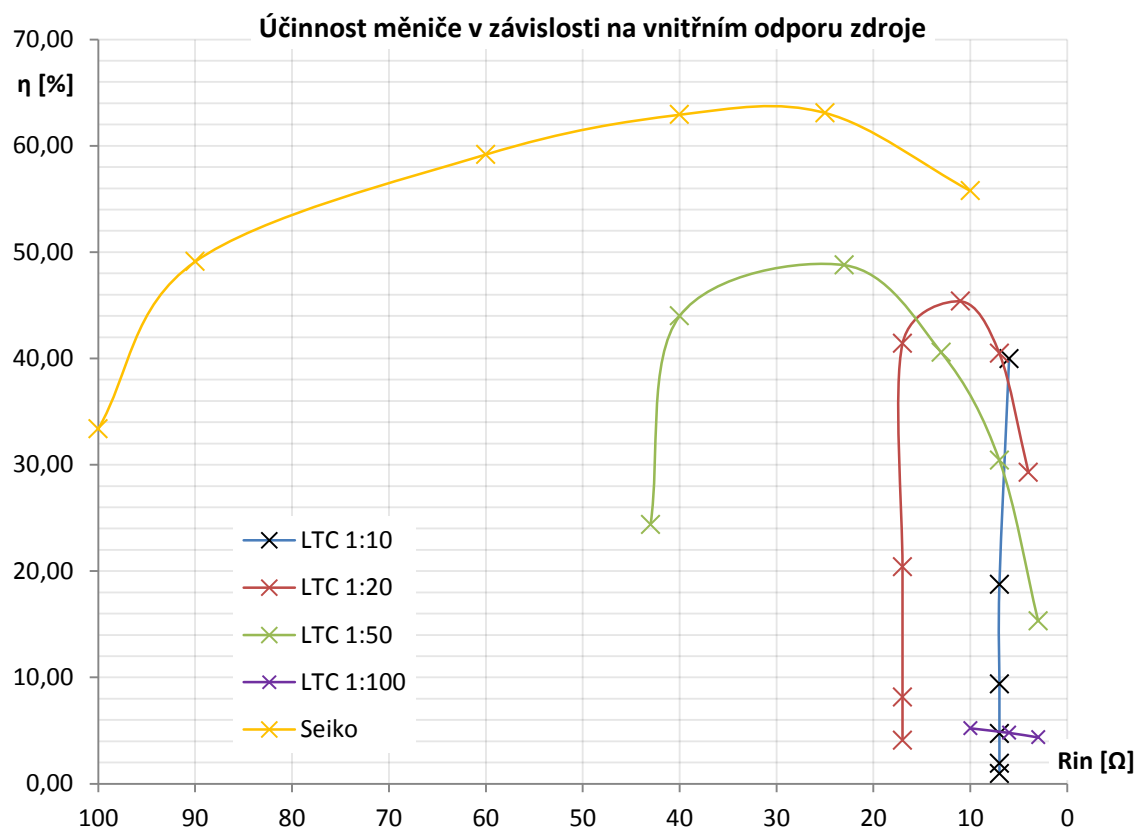
Obrázek 5.4 - Maximální dosažitelný výstupní výkon měniče v závislosti na příkonu měniče



Obrázek 5.5 - Maximální dosažitelný výstupní výkon měniče v závislosti na vnitřním odporu zdroje



Obrázek 5.6 - Účinnost měniče v závislosti na příkonu měniče



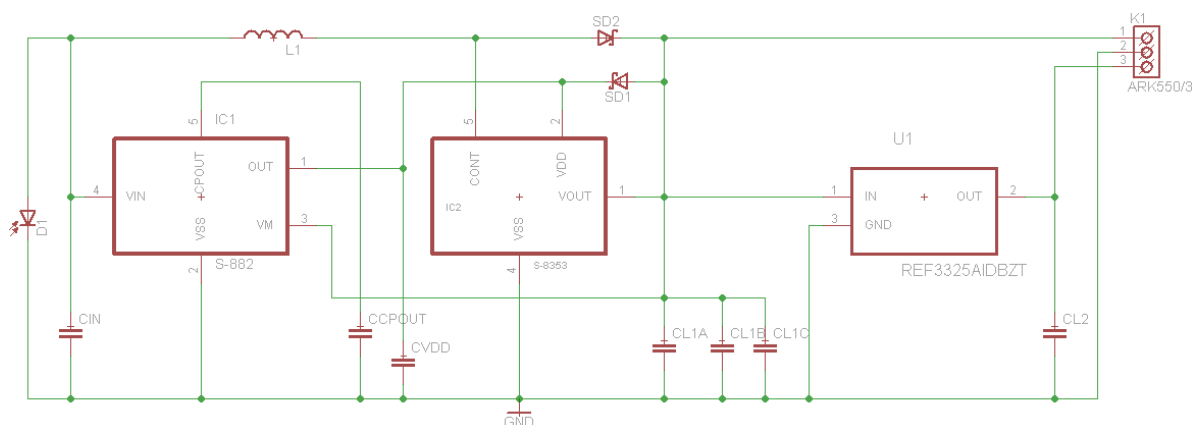
Obrázek 5.7 - Účinnost měniče v závislosti na vnitřním odporu zdroje

5.2 Modifikace obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC

Z hodnot naměřených na obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC (kapitola 4.2) je zřejmé, že měnič dokáže při daných podmínkách poskytnout stabilní výstupní napětí. Je ovšem nutné dodržet co nejnížší spotřebu navazující elektroniky, která má být z měniče napájena. Měnič Seiko dokáže poskytnout stabilní napětí 3 V ještě při odběru 1824,1 μ W (příloha 3, tabulka 9; vstupní napětí 600,3 mV; vnitřní odpor zdroje 25 Ω ; zátěž 5 k Ω). Při této konfiguraci také byla dosažena nejvyšší účinnost 63,09%.

Účinnost měniče Seiko při plném výstupním napětí 3 V se ve většině případů pohybovala v rozmezí 40 až 60%, což jsou velmi dobré hodnoty, vezmeme-li v úvahu, že obvod provozujeme v podmínkách, ke kterým není přímo určený.

Měnič Seiko by pro naše účely mohl posloužit lépe než měnič Linear Technology. Obvod jsem tedy upravil a navrhl novou desku plošných spojů. Přímě na vstup obvodu jsem přidal fotodiodu Tesla 3WN16620, která slouží jako zdroj energie pro nábojovou pumpu S-822Z20. Na výstup obvodu jsem přidal napěťovou referenci 2,5 V Texas Instruments REF3325 pro navazující elektroniku. Deska je navržena pro montáž do krabičky.



Obrázek 5.8 - Schéma zapojení upraveného měniče s S-822Z20 a S-8353D30MC

Použité součástky:

D1 - fotodioda Tesla 3WN16620

SD1, SD2 - Schottkyho dioda SS14

CIN – 47 μ F

CL1A, CL1B, CL1C, CCPOUT – 10 μ F

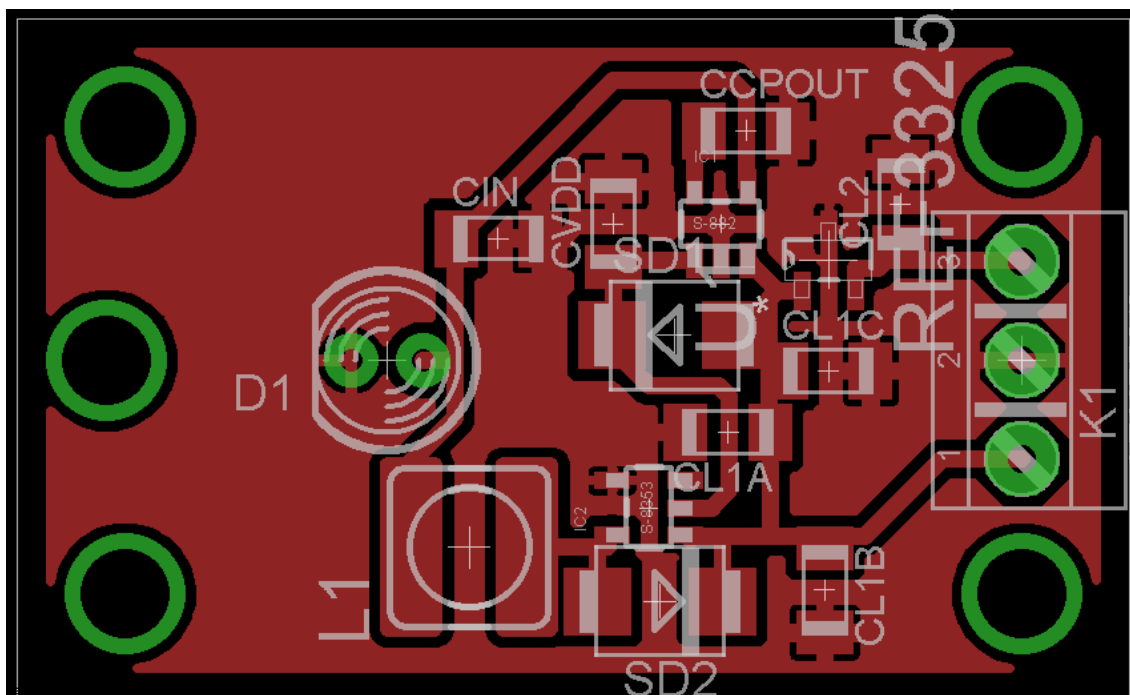
CL2, CVDD – 1 μ F

L1 - tlumivka SCB5D28 100 μ H

U1 - napěťová reference 2,5 V Texas Instruments REF3325AIDBZT

IC1 – Seiko S-882Z20

IC2 – Seiko S-8353D30MC



Obrázek 5.9 - DPS upraveného měniče s S-822Z20 a S-8353D30MC

Tabulka 5.1 - Vlastnosti fotodiody Tesla 3WN16620 [10]

Fotodioda TESLA 3 WN 166 20 ($T_P = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)						
Parametr	Symbol	Podmínka	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Proud v propustném směru	I_F	-		100		mA
Napětí v závěrném směru	U_R	-		20		V
Proud za tmy	I_R	$U_R = 20\text{ V}$ $\lambda = 820\text{ nm}$	0,40	1,00	5,00	nA
Citlivost	S	$U_R = 5\text{ V}$ $\lambda = 820\text{ nm}$	0,40	0,47	5,00	A / W
Citlivost v oblasti vlnových délek	λ	-		820 ± 40		nm
Doba náběhu a doběhu	t	$U_R = 5\text{ V}$		1		ns
Konstrukční vlastnosti - TESLA 3 WN 166 20						
Provedení	konektorovaná (FC) pro SM nebo MM optická vlákna					



Obrázek 5.10 - Fotodioda Tesla 3WN16620 [10]

5.2.1 Měření na upraveném obvodu Seiko

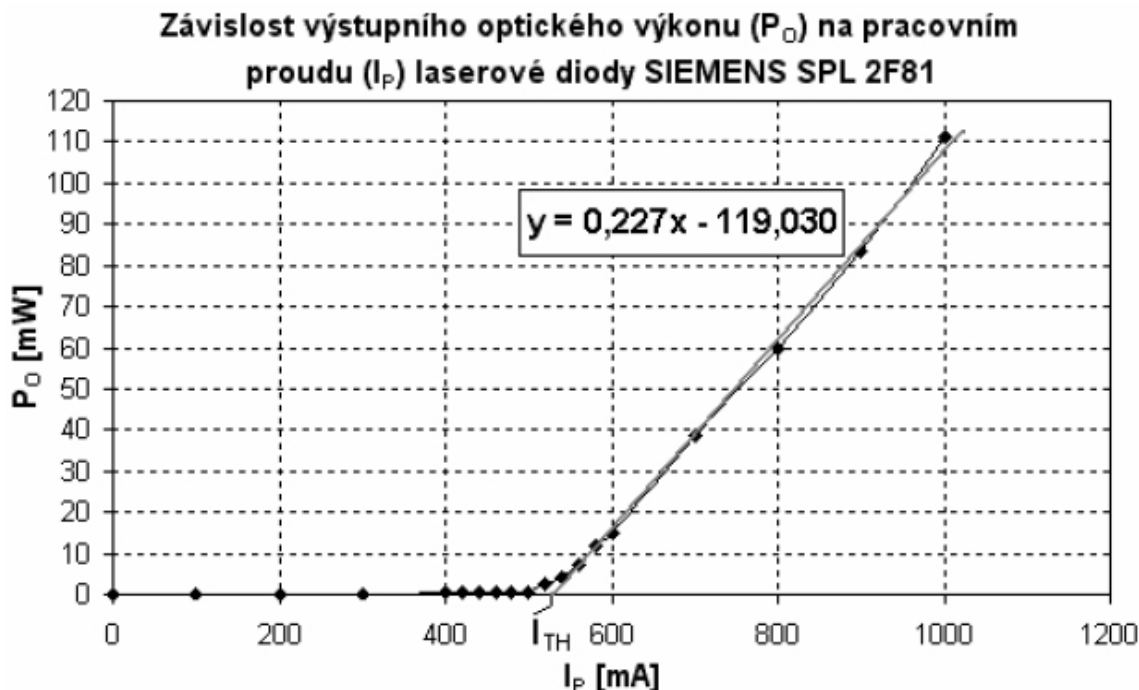
Fotodioda byla osvětlována po optickém vedení PC-2J-0003 (850 nm, číslo 57391195, vložný útlum $\leq 0,7$ dB) laserovou diodou Siemens SPL 2F81.

Tabulka 5.2 - Vlastnosti laserové diody Siemens SPL 2F81 [10]

Laserová dioda SIEMENS SPL 2F81 (T _P = 25 °C)					
Parametr	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Prahový proud	I _{TH}	0,40	0,45	0,55	A
Pracovní proud	I _P	1,3	1,5	1,8	A
Pracovní napětí	U _P	2			V
Závěrné napětí	U _R	-	-	3	V
Diferenciální účinnost	η	0,60	0,70	0,85	W / A
Vlnová délka záření	λ	803	808	813	nm
Spektrální šířka	Δλ	2			nm
Výstupní optický výkon	P ₀	-	-	0,8	W
Provozní vlastnosti - SIEMENS SPL 2F81					
Parametr	Symbol	Rozsah			Jednotka
Provozní rozsah teplot	T _P	- 10 ~ + 60			°C
Konstrukční vlastnosti - SIEMENS SPL 2F81					
Pouzdro + provedení	TO - 220 + konektorovaná (FC) pro SM nebo MM optická vlákna				



Obrázek 5.11 - Laserová dioda Siemens SPL 2F81 [10]



Obrázek 5.12 - Závislost výstupního optického výkonu laserové diody Siemens SPL 2F81 na jejím pracovním proudu [10]

Proměřil jsem závislost maximálního výstupního výkonu upraveného měniče s obvodu S-822Z20 a S-8353D30MC na proudu laserovou diodou. Jako zátěž sloužila odporová dekáda. Vliv měřicích přístrojů na měřené hodnoty byl zanedbán. Maximální dosažitelná hodnota výstupního napětí byla 3,00 V.

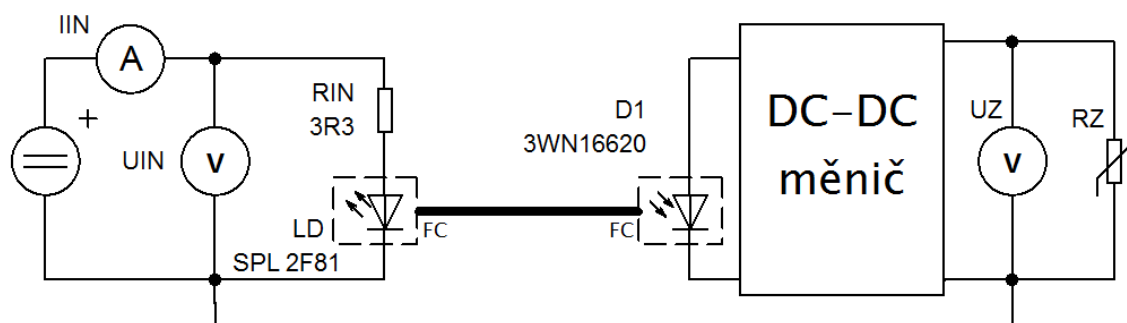
Pro každou z měřených hodnot jsem nejprve nastavil hodnotu zátěže a následně zvyšoval proud laserovou diodou, dokud na výstupu měniče nevystoupalo napětí na maximální hodnotu. Při daných hodnotách proudu laserovou diodou jsem tedy ověřil maximální zatížitelnost měniče.

Z naměřených hodnot jsem dopočítal závislosti maximálního výstupního výkonu na proudu laserovou diodou podle rovnice 1 a závislosti účinnosti sestavy na proudu laserovou diodou podle rovnice

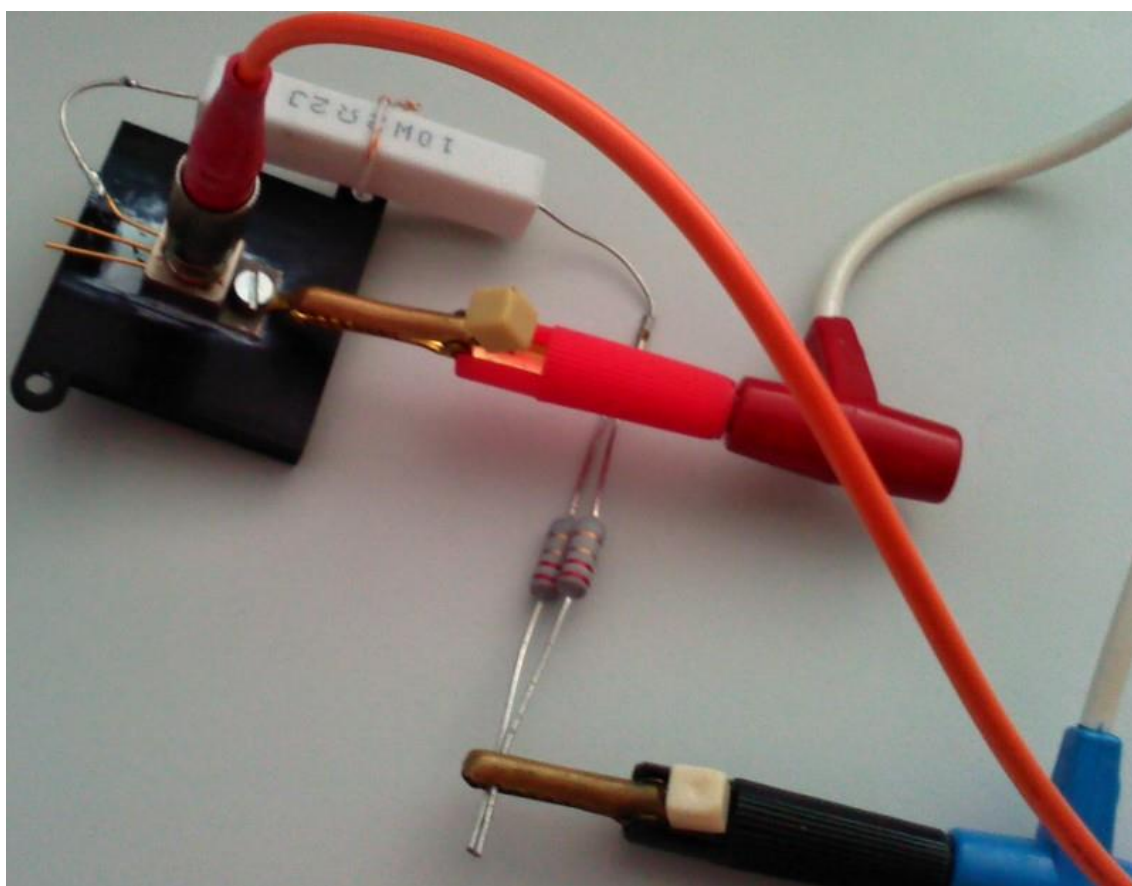
$$\eta = \frac{P_Z}{(U_{IN} - (R_{IN} * I_{IN})) * I_{IN}} * 100 \quad [\%] \quad \text{rov. (4)}$$

Použité přístroje:

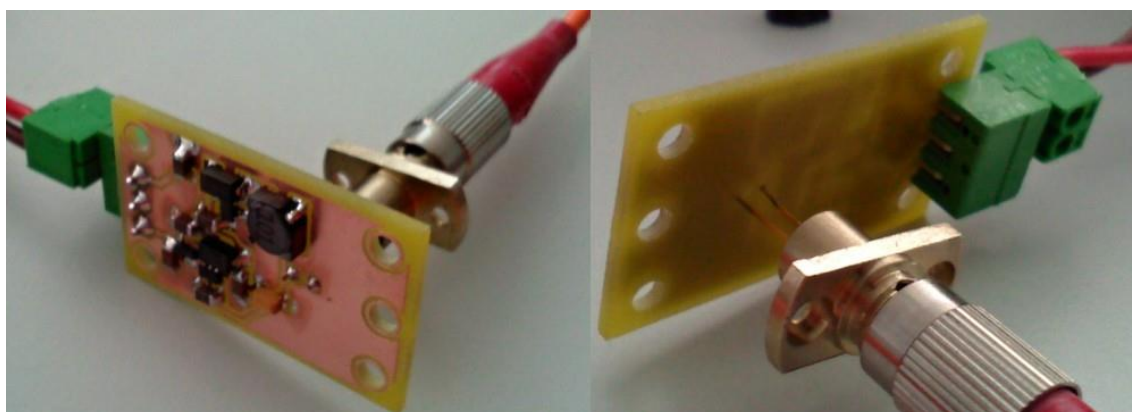
Stejnoseměrný zdroj napětí	Agilent E3631A
Voltmetr UIN	UNI-T UT804
Voltmetr UZ	HP 34401A
Ampérmetr IIN	Agilent 34410A
Odporová dekáda RZ	Metra XL6 - 4370200072



Obrázek 5.13 - Schéma zapojení měření upraveného měniče Seiko



Obrázek 5.14 - Laserová dioda Siemens SPL 2F81 při měření



Obrázek 5.15 - Měnič Seiko s fotodiodou Tesla 3WN16620 na vstupu při měření

5.2.2 Výsledky naměřené na upraveném obvodu Seiko

Tabulka 5.3 - Závislosti maximálního výstupního výkonu a účinnosti upraveného obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na proudu laserovou diodou Siemens SPL 2F81

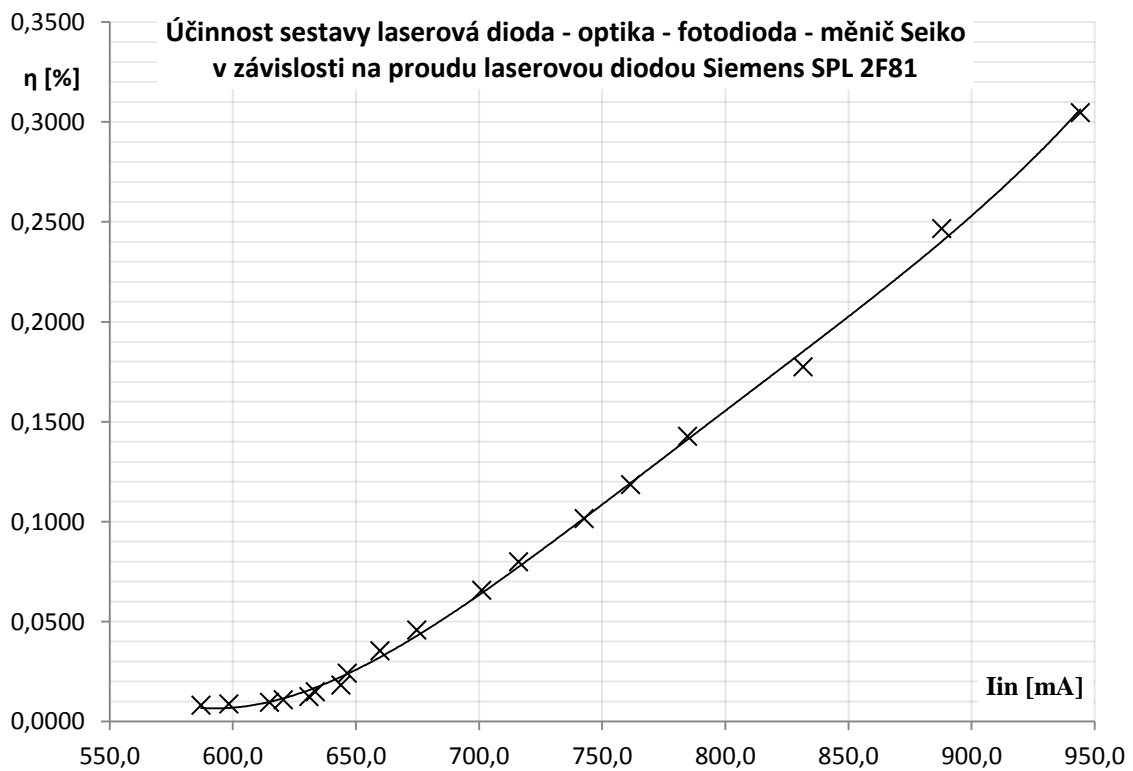
R_z [k Ω]	I_{IN} [mA]	U_{IN} [V]	U_z [V]	P_{IN} [W]	P_z [μ W]	η [%]
100	587,1	3,838	3,00	1,12	90,00	0,0081
90	598,5	3,878	3,00	1,14	100,00	0,0088
80	615,0	3,938	3,00	1,17	112,50	0,0096
70	620,5	3,958	3,00	1,19	128,57	0,0108
60	630,9	3,998	3,00	1,21	150,00	0,0124
50	633,6	4,005	3,00	1,21	180,00	0,0148
40	644,0	4,044	3,00	1,24	225,00	0,0182
30	646,6	4,054	3,00	1,24	300,00	0,0242
20	659,8	4,103	3,00	1,27	450,00	0,0354
15	674,7	4,172	3,00	1,31	600,00	0,0457
10	701,1	4,272	3,00	1,37	900,00	0,0655
8	716,1	4,331	3,00	1,41	1125,00	0,0798
6	742,8	4,440	3,00	1,48	1500,00	0,1015
5	761,6	4,509	3,00	1,52	1800,00	0,1184
4	784,7	4,599	3,00	1,58	2250,00	0,1427
3	831,7	4,777	3,00	1,69	3000,00	0,1775
2	887,9	4,985	3,00	1,82	4500,00	0,2466
1,5	944,2	5,202	3,00	1,97	6000,00	0,3046

Hodnota P_{IN} vyjadřuje elektrický výkon dodávaný laserové diodě, hodnota P_z maximální dosažitelný elektrický výkon na výstupu DC-DC měniče.

Uvedená účinnost vyjadřuje účinnost celé sestavy – přeměna elektrické energie na světelnou, její přenos po optickém vlákně, opětovná přeměna na elektrickou energii a následná funkce DC-DC měniče, proto jsou hodnoty účinnosti tak nízké. Účinnost samotného měniče napětí Seiko se podle předchozích měření (kapitola 4.2) pohybuje převážně v rozmezí 40 až 60%.



Obrázek 5.16 - Závislost maximálního dosažitelného výstupního výkonu obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na proudu laserovou diodou Siemens SPL 2F81



Obrázek 5.17 - Účinnost sestavy laserová dioda - optika - fotodioda - měnič Seiko v závislosti na proudu laserovou diodou Siemens SPL 2F81

6 ZÁVĚR

Úvodní část práce pojednává o dostupných zvyšujících měničích velmi nízkých napětí. Z nich jsem zvolil dva, na kterých jsem měřením ověřil možnost činnosti s fotodiodou jako zdrojem energie. Bylo tedy nutné, aby obvod splňoval velmi specifický požadavek na schopnost práce se zdrojem napětí s vnitřním odporem minimálně 20 Ω poskytujícím napětí nanejvýš 0,6 V.

Měření závislosti výstupního napětí obvodu na vnitřním odporu zdroje jsem provedl v návaznosti na předchozí práce [8][9] na již realizovaných měničích s integrovanými obvody Linear Technology LTC3109 a Seiko S-822Z20 v kombinaci s S-8353D30MC.

Z výsledků naměřených na obvodu s LTC3109 je zřejmé, že obvod sice dokáže vytvořit na výstupu stabilní napětí 5 V už z velmi malých vstupních napětí (pod 100 mV), ale nedokáže pracovat s vnitřním odporem zdroje v řádu desítek Ω . Pro zátěž 100 k Ω (tabulka 4.1) dokáže pracovat s vnitřním odporem zdroje 10 Ω , pro zátěž 10 k Ω (příloha 1, tabulka 4) je už i vnitřní odpor zdroje 3 Ω příliš velký. Naměřená účinnost obvodu byla také velmi nízká, pohybovala se v jednotkách procent. Nejvyšší účinnosti 6,55% bylo dosaženo při $U_{IN} = 500,0$ mV; $R_{IN} = 6$ Ω ; $R_Z = 50$ k Ω ; $U_Z = 4,9$ V (příloha 1, tabulka 2). Měnič v dané konfiguraci se vstupními transformátory s převodem 1:100 tedy nesplňuje potřebné požadavky. Je navržen pro získávání energie z Peltierových článků, které mají nízký vnitřní odpor.

Z hodnot naměřených na obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC je zřejmé, že měnič dokáže při daných podmínkách poskytnout stabilní výstupní napětí. Je ovšem nutné dodržet co nejnižší spotřebu navazující elektroniky, která má být z měniče napájena. Měnič Seiko dokáže poskytnout stabilní napětí 3V ještě při odběru 1824,1 μ W (příloha 3, tabulka 9; vstupní napětí 600,3 mV; vnitřní odpor zdroje 25 Ω ; zátěž 5 k Ω). Při této konfiguraci také byla dosažena nejvyšší účinnost 63,09%. Účinnost měniče Seiko při plném výstupním napětí 3 V se ve většině případů pohybovala v rozmezí 40 až 60%, což jsou velmi dobré hodnoty, vezmeme-li v úvahu, že obvod provozujeme v podmínkách, ke kterým není přímo určený.

Na základě provedených měření jsem stejným způsobem proměřil závislosti nově navrženého obvodu s LTC3109 v unipolárním zapojení se vstupním transformátorem v poměru 1:10, 1:20 a 1:50. Změna převodu transformátoru podle předpokladu zlepšila vlastnosti obvodu, ne ovšem tolik, abychom ho mohli napájet fotodiodou. Práce se zdrojem s vnitřním odporem 20 Ω a vyšším byla pro obvod stále problematická, jak je vidět na grafech v kapitole 5.1.1. Bylo dosaženo alespoň lepší účinnosti – maximálně 48,77% s transformátorem 1:50; $R_{IN} = 23$ Ω ; $R_Z = 20$ k Ω ; $P_Z = 544,5$ μ W (příloha 5, tabulka 13).

Z grafů v kapitole 5.1.1 je také vidět, že obvod kombinující nábojovou pumpu Seiko S-822Z20 a zvyšující DC-DC měnič napětí Seiko S-8353D30MC je vhodnější

pro transformaci světelné energie přijaté fotodiodou než obvod s LTC3109. Proto jsem ho zvolil pro použití ve finálním přípravku.

Navrhl jsem nový obvod měniče Seiko, na jehož vstup je připojena fotodioda Tesla 3WN16620. Tu jsem po optickém vlákně osvětloval laserovou diodou Siemens SPL 2F81 a proměřil maximální zatížitelnost měniče. Podařilo se dosáhnout výstupního výkonu 6 mW při proudu laserovou diodou 944,2 mA (tabulka 5.3). Účinnost celé sestavy (přeměna elektrické energie na světelnou, její přenos po optickém vlákně, opětovná přeměna na elektrickou energii a následná funkce DC-DC měniče) byla v tomto případě 0,3046%. Závislosti jsou zobrazeny v grafech 5.16 a 5.17.

Vzhledem k neefektivní vícenásobné přeměně energie považuji tyto hodnoty za přijatelné a realizovaný měnič za prakticky použitelný pro napájení nízkopříkonové navazující elektroniky. Krátkodobý nárůst spotřeby zátěže (zlomky až jednotky sekund) dokáže měnič překlenout s mírným poklesem výstupního napětí.

Nejslabším článkem řetězce je zřejmě fotodioda. Nalezením vhodnějšího typu s větší citlivostí bychom mohli výrazně zlepšit účinnost celého systému. Laserová dioda se při napájecích proudech blížících se 1 A silně zahřívá, což při dlouhodobém provozu rovněž může negativně ovlivnit účinnost a bylo by proto vhodné opatřit ji aktivním chlazením.

Seznam bibliografických citací

- [1] Energy harvesting. In *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 18 January 2005, last modified on 4 December 2012 [cit. 2012-12-27]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_harvesting
- [2] ECT 310 Perpetuum. *EnOcean.com*. Ultra Low Power DC/DC Converter for Thermal Energy Harvester [online]. © 2012 [cit. 2012-12-27]. Dostupné z: http://www.enocean.com/en/enocean_modules_315mhz/ect-310-perpetuum/
- [3] TPS61200. *Texas Instruments* [online]. © 1995-2012 [cit. 2012-12-27]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/tps61200>
- [4] Energy Harvesting. *Linear Technology* [online]. © 2012 [cit. 2012-12-28]. Dostupné z: http://parametric.linear.com/Energy_Harvesting
- [5] *Ultra-Low Voltage Operation Charge Pump IC for Step-up DC-DC Converter Startup S-882Z series*, Rev.2.0 [online]. Japonsko: Seiko Instruments Inc., 2010, [cit. 2012-12-29]. Dostupné z: http://datasheet.sii-ic.com/en/charge_pump_ic/S882Z_E.pdf
- [6] *Step-Up, PWM Control or PWM/PFM Switchable Built-in Transistor Switching Regulator S-8353/8354 series*, Rev.3.0 [online]. Japonsko: Seiko Instruments Inc., 2010, [cit. 2012-12-29]. Dostupné z: http://datasheet.sii-ic.com/en/switching_regulator/S8353_8354_E.pdf
- [7] DVORSKÝ, P. *Měřicí modul napájený po optickém vlákně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 57s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.
- [8] HUBENÝ, F. a M. KARÁSEK. *Power harvesting – Peltierův článek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. Semestrální práce. 32s.
- [9] PŘIKRYL, K. *Generátorové snímače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 49 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [10] BAURA, T. *Současný obousměrný přenos dat a napájecího signálu jedním optickým vláknem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 88 s, 2 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 - ECT 310 Perpetuum [2]	9
Obrázek 3.1 - Schéma zapojení měniče s LTC3109 [8]	12
Obrázek 3.2 - DPS měniče s LTC3109 [8]	12
Obrázek 3.3 - Podoba realizovaného měniče s LTC3109	13
Obrázek 3.4 - Vnitřní schéma integrovaného obvodu Seiko S-882Z20 [5].	14
Obrázek 3.5 - Schéma zapojení měniče napětí Seiko [5]	15
Obrázek 3.6 - Podoba realizovaného měniče Seiko [9]	16
Obrázek 4.1 - Schéma zapojení DC-DC měničů při měření závislosti	17
Obrázek 4.2 - Závislost výstupního napětí obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100\text{ k}\Omega$	20
Obrázek 4.3 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100\text{ k}\Omega$	20
Obrázek 4.4 - Závislost účinnosti obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100\text{ k}\Omega$	21
Obrázek 4.5 - Závislost výstupního napětí obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$	23
Obrázek 4.6 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$	23
Obrázek 4.7 - Závislost účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$	24
Obrázek 5.1 - Unipolární zapojení měniče s LTC3109	25
Obrázek 5.2 - DPS upraveného měniče s LTC3109	26
Obrázek 5.3 - Výsledná podoba upraveného měniče s LTC3109	26
Obrázek 5.4 - Maximální dosažitelný výstupní výkon měniče v závislosti na příkonu měniče .	28
Obrázek 5.5 - Maximální dosažitelný výstupní výkon měniče v závislosti na vnitřním odporu zdroje	28
Obrázek 5.6 - Účinnost měniče v závislosti na příkonu měniče	29
Obrázek 5.7 - Účinnost měniče v závislosti na vnitřním odporu zdroje	29
Obrázek 5.8 - Schéma zapojení upraveného měniče s S-822Z20 a S-8353D30MC	30
Obrázek 5.9 - DPS upraveného měniče s S-822Z20 a S-8353D30MC	31
Obrázek 5.10 - Fotodiody Tesla 3WN16620 [10]	31
Obrázek 5.11 - Laserová dioda Siemens SPL 2F81 [10]	32
Obrázek 5.12 - Závislost výstupního optického výkonu laserové diody Siemens SPL 2F81 na jejím pracovním proudu [10]	33

Obrázek 5.13 - Schéma zapojení měření upraveného měniče Seiko	34
Obrázek 5.14 - Laserová dioda Siemens SPL 2F81 při měření	34
Obrázek 5.15 - Měnič Seiko s fotodiodou Tesla 3WN16620 na vstupu při měření	34
Obrázek 5.16 - Závislost maximálního dosažitelného výstupního výkonu obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na proudu laserovou diodou Siemens SPL 2F81	36
Obrázek 5.17 - Účinnost sestavy laserová dioda - optika - fotodioda - měnič Seiko v závislosti na proudu laserovou diodou Siemens SPL 2F81	36

Seznam tabulek

Tabulka 2.1 - Porovnání vlastností obvodů LTC [4]	10
Tabulka 3.1 - Použité součástky - měnič Seiko [9].....	15
Tabulka 4.1 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100\text{ k}\Omega$	19
Tabulka 4.2 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$	22
Tabulka 5.1 - Vlastnosti fotodiody Tesla 3WN16620 [10].....	31
Tabulka 5.2 - Vlastnosti laserové diody Siemens SPL 2F81 [10]	32
Tabulka 5.3 - Závislosti maximálního výstupního výkonu a účinnosti upraveného obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na proudu laserovou diodou Siemens SPL 2F81.....	35

Seznam příloh

Příloha 1 - Tabulky závislostí obvodu LTC3109
Příloha 2 - Grafy závislostí obvodu LTC3109
Příloha 3 - Tabulky závislostí obvodu Seiko
Příloha 4 - Grafy závislostí obvodu Seiko
Příloha 5 - Tabulky závislostí upraveného obvodu LTC3109
Příloha 6 - CD

Příloha 1 - Tabulky závislostí obvodu LTC3109

Tabulka 1 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100\text{ k}\Omega$

$R_z = 100\text{ k}\Omega$					
$U_{IN} [\text{mV}]$	$R_{IN} [\Omega]$	$U_{IN2} [\text{mV}]$	$U_z [\text{V}]$	$P_z [\mu\text{W}]$	$\eta [\%]$
600,6	20	57,8	0	0,0	0,00
600,4	15	69,9	3,6	129,6	5,24
600,3	12	82,2	4,8	230,4	6,49
600,1	10	93,5	4,97	247,0	5,21
500,8	15	60,0	0	0,0	0,00
500,7	12	70,6	3,5	122,5	4,84
500,5	10	80,7	4,5	202,5	5,98
500,3	8	93,5	4,97	247,0	5,20
400,8	12	58,6	0	0,0	0,00
400,8	10	66,6	3,2	102,4	4,60
400,6	8	78,1	4	160,0	5,08
400,3	6	94,0	4,97	247,0	5,15
300,1	8	60,9	0	0,0	0,00
300,0	6	73,7	3,5	122,5	4,41
300,5	4	94,6	4,97	247,0	5,07
200,3	6	52,2	0	0,0	0,00
200,2	4	66,4	3,1	96,1	4,33
100,9	4	37,8	0	0,0	0,00

Tabulka 2 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 50\text{ k}\Omega$

$R_z = 50\text{ k}\Omega$					
$U_{IN} [\text{mV}]$	$R_{IN} [\Omega]$	$U_{IN2} [\text{mV}]$	$U_z [\text{V}]$	$P_z [\mu\text{W}]$	$\eta [\%]$
600,4	15	121,5	0	0,0	0,00
600,2	12	82,9	2,2	96,8	2,71
600,0	10	94,6	3,5	245,0	5,12
599,8	8	109,7	4,65	432,5	6,43
599,4	6	132,8	4,97	494,0	4,78
500,3	8	94,3	0	0,0	0,00
500,0	6	114,0	4,9	480,2	6,55
499,8	5	128,1	4,97	494,0	5,19
400,4	6	94,8	0	0,0	0,00
400,2	5	106,2	4,3	369,8	5,92
400,0	4	121,5	4,97	494,0	5,84
300,5	4	95,1	0	0,0	0,00

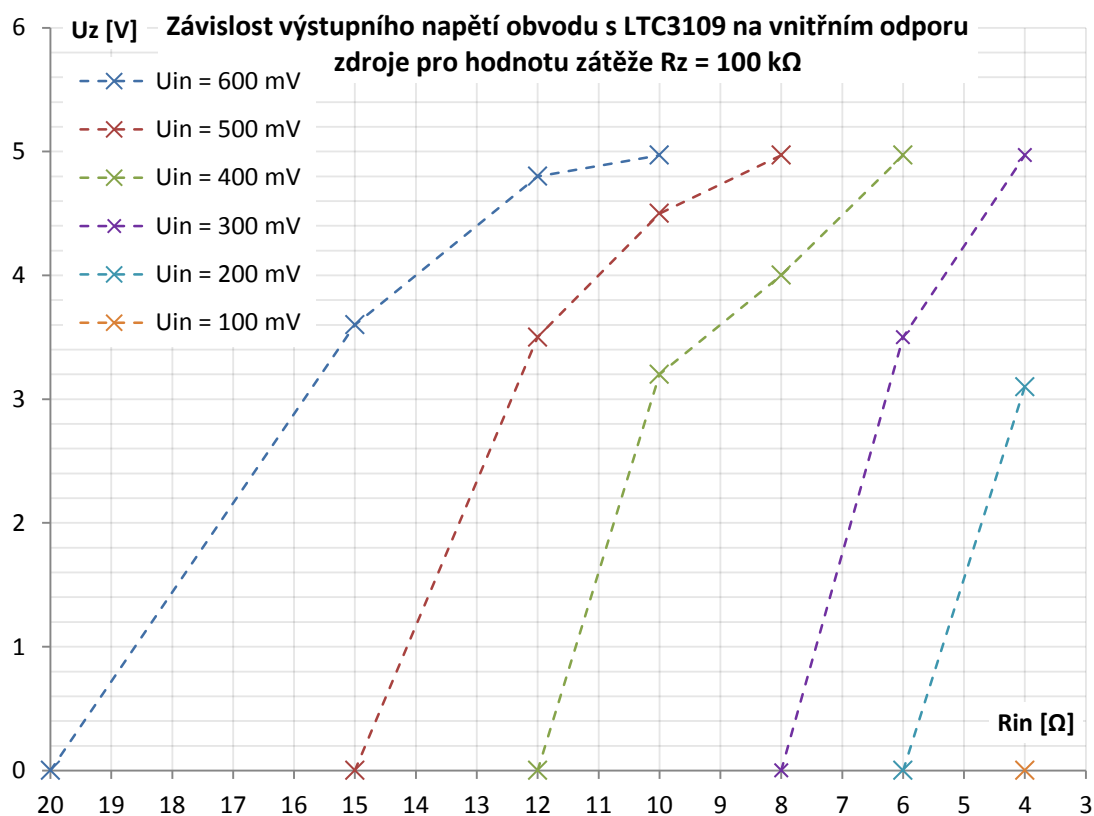
Tabulka 3 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 20\text{ k}\Omega$

$R_z = 20\text{ k}\Omega$					
$U_{IN} [\text{mV}]$	$R_{IN} [\Omega]$	$U_{IN2} [\text{mV}]$	$U_z [\text{V}]$	$P_z [\mu\text{W}]$	$\eta [\%]$
600,0	10	95,3	0	0,0	0,00
600,9	8	128,5	1,8	162,0	2,13
600,6	6	146,8	2,8	392,0	3,53
600,3	5	163,5	3,3	544,5	3,81
600,0	4	188,2	4	800,0	4,13
599,5	3	230,7	4,97	1235,0	4,35
500,9	5	142,3	0	0,0	0,00
500,6	4	160,1	3,2	512,0	3,76
500,2	3	189,1	4,1	840,5	4,29
400,0	4	134,8	0	0,0	0,00
400,7	3	154,8	3,1	480,5	3,79
300,3	3	127,2	0	0,0	0,00

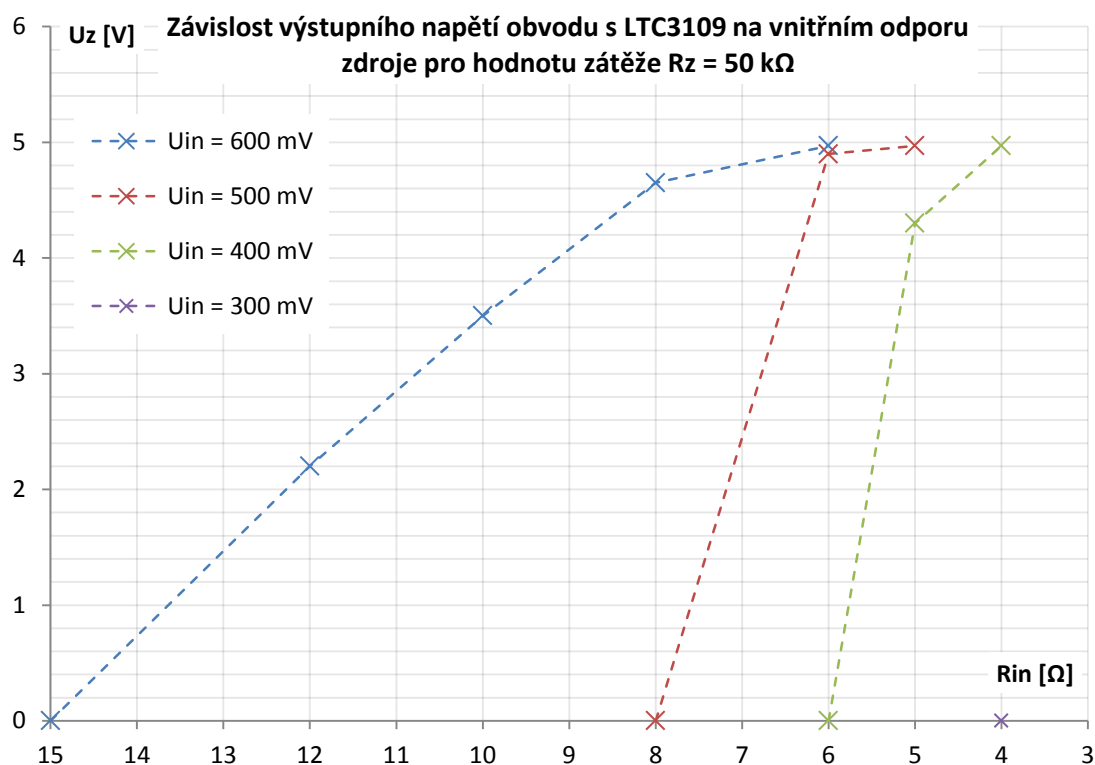
Tabulka 4 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$

$R_z = 10\text{ k}\Omega$					
$U_{IN} [\text{mV}]$	$R_{IN} [\Omega]$	$U_{IN2} [\text{mV}]$	$U_z [\text{V}]$	$P_z [\mu\text{W}]$	$\eta [\%]$
600,0	10	110,9	0	0,0	0,00
600,8	8	127,9	0,8	64,0	0,85
600,5	6	154,8	1,8	324,0	2,82
600,2	5	169,8	2,3	529,0	3,62
600,6	4	182,9	2,7	729,0	3,82
600,1	3	217,4	3,1	961,0	3,47
500,5	4	170,6	0	0,0	0,00
500,0	3	184,1	2,7	729,0	3,76
400,7	3	164,9	0	0,0	0,00

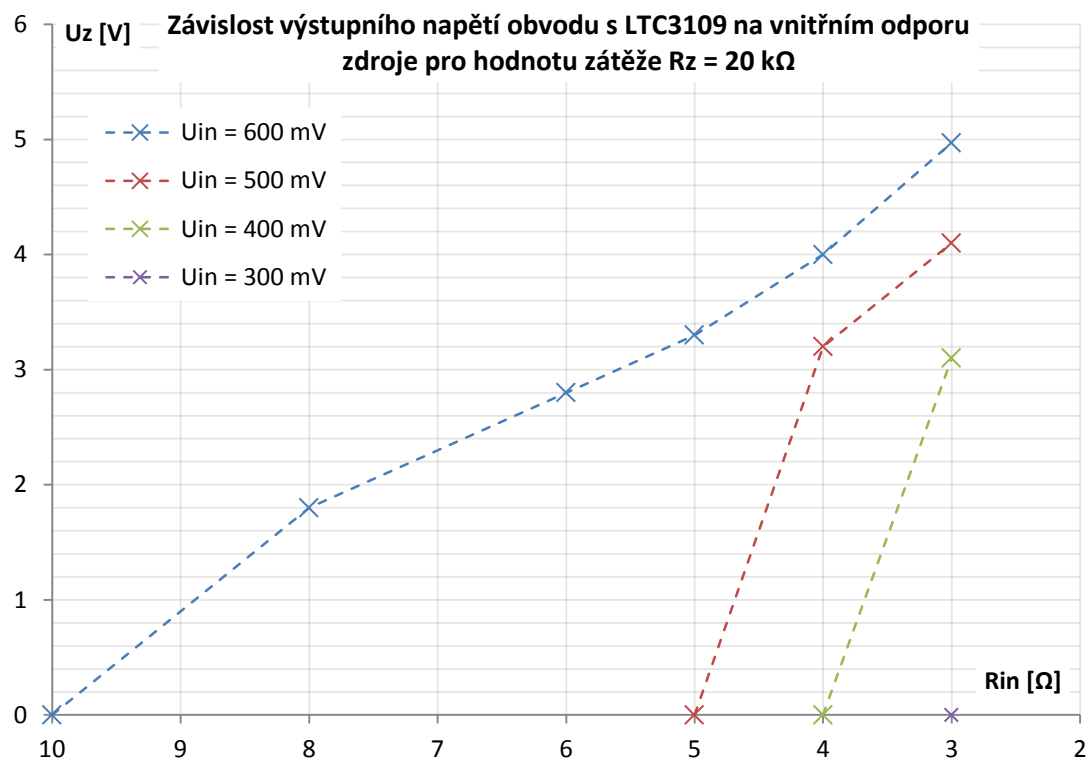
Příloha 2 - Grafy závislostí obvodu LTC3109



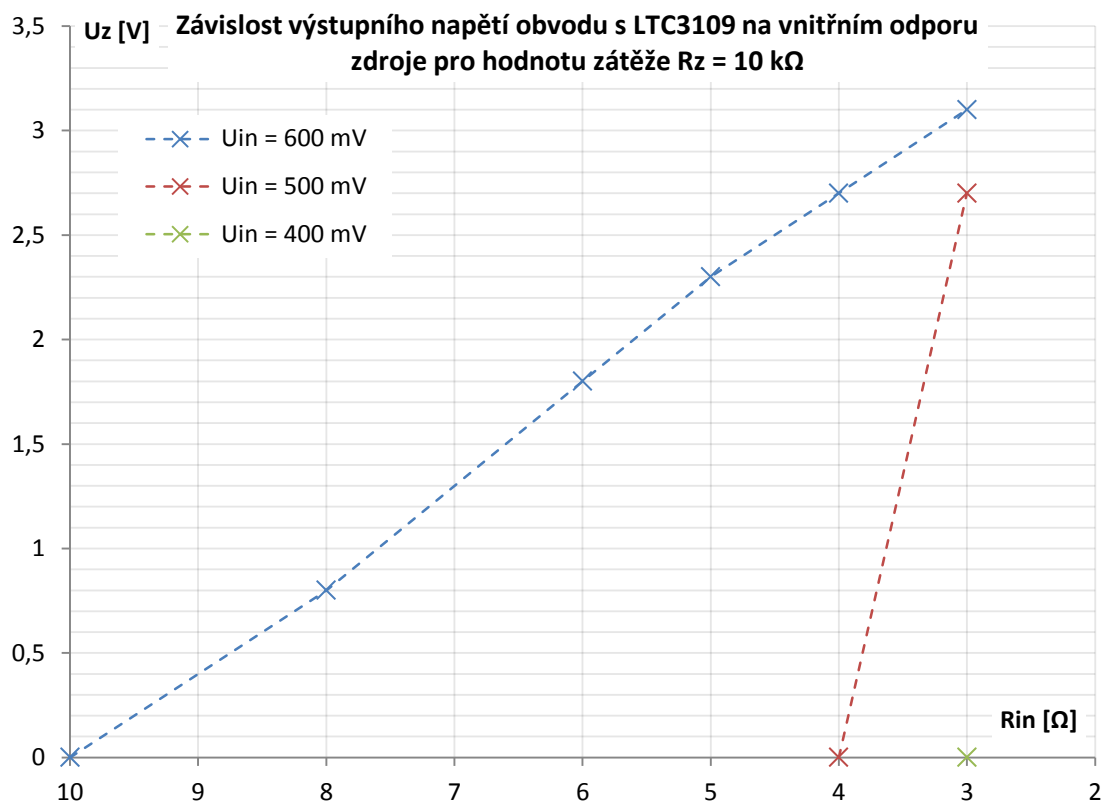
Obrázek 1 - Závislost výstupního napětí obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100\text{ k}\Omega$



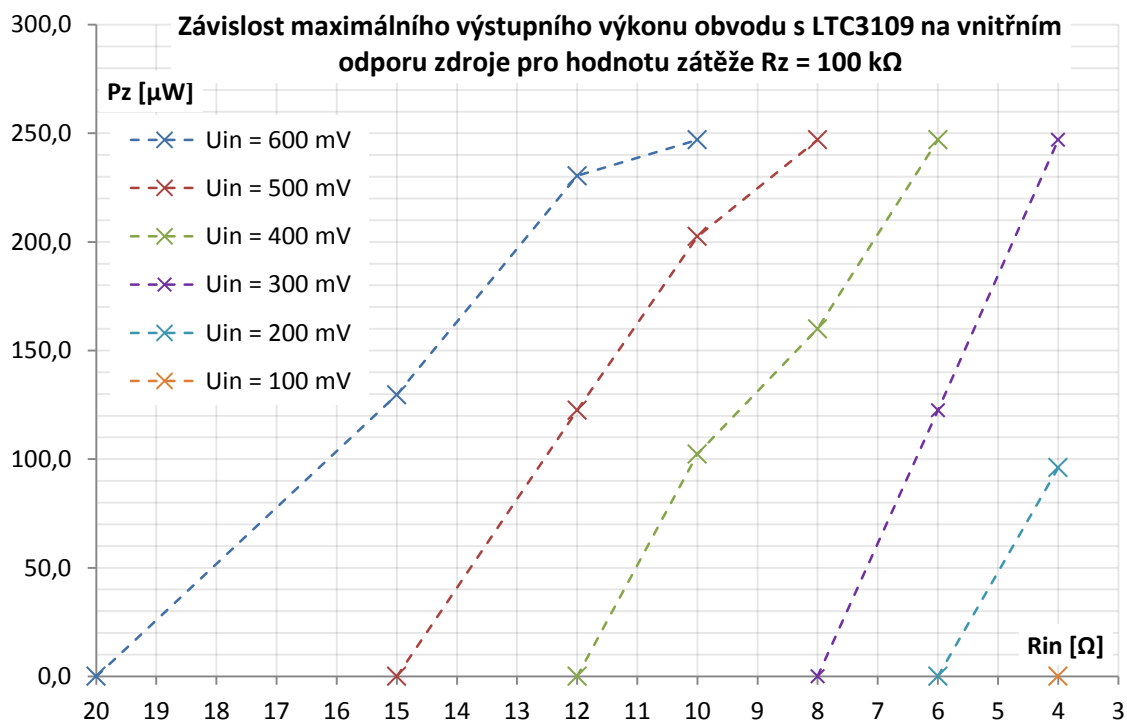
Obrázek 2 - Závislost výstupního napětí obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže R_z = 50 kΩ



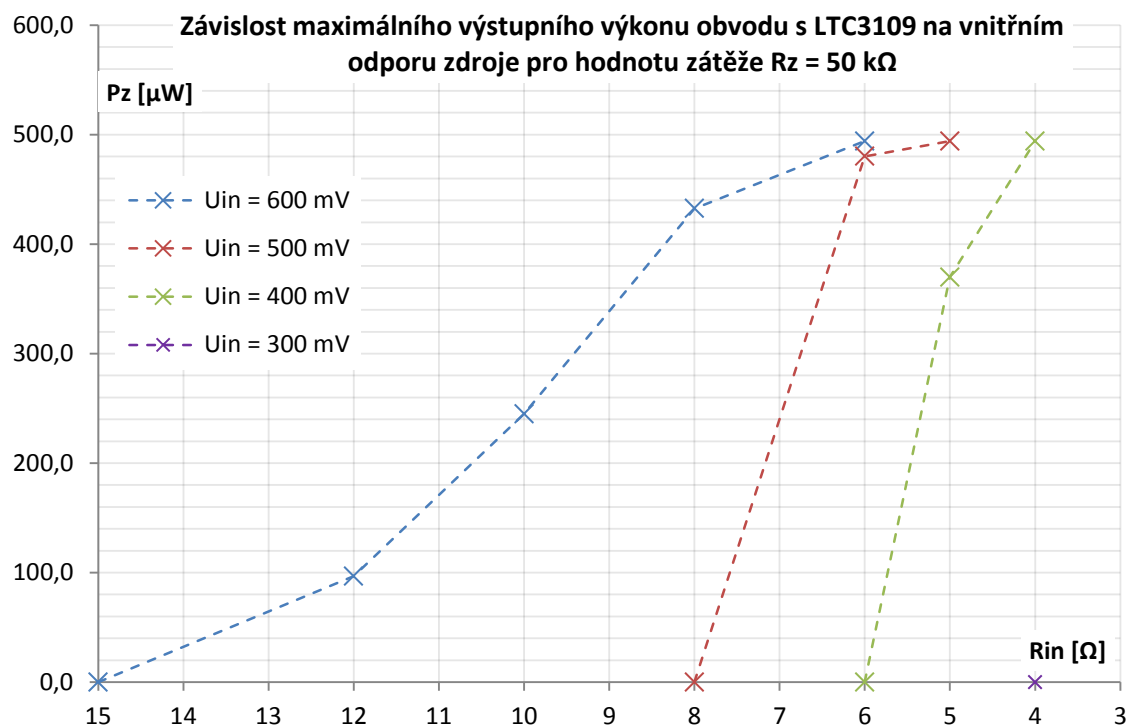
Obrázek 3 - Závislost výstupního napětí obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže R_z = 20 kΩ



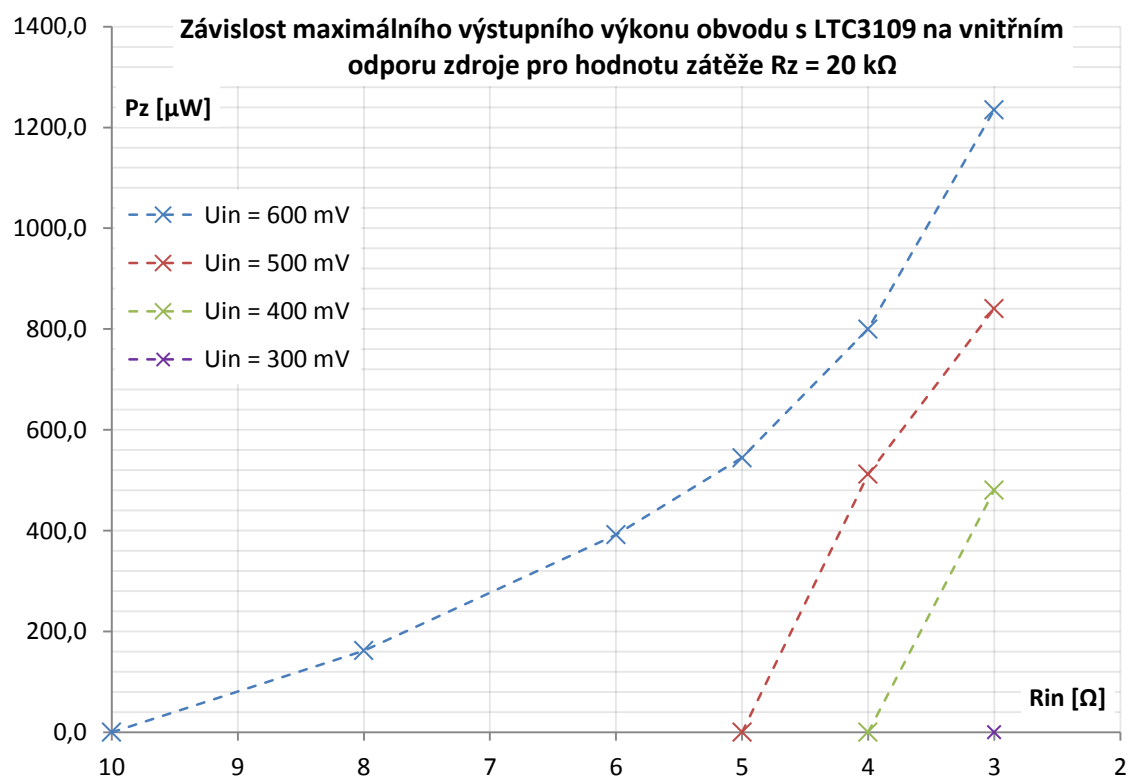
Obrázek 4 - Závislost výstupního napětí obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže R_z = 10 kΩ



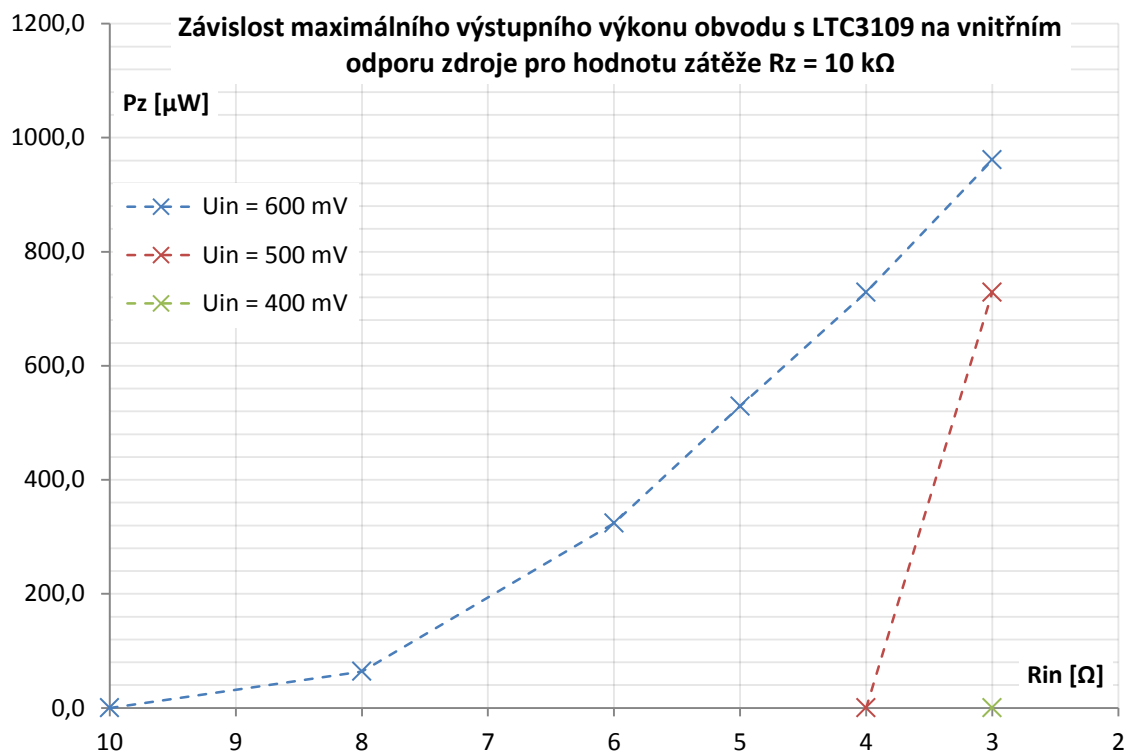
Obrázek 5 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže R_z = 100 kΩ



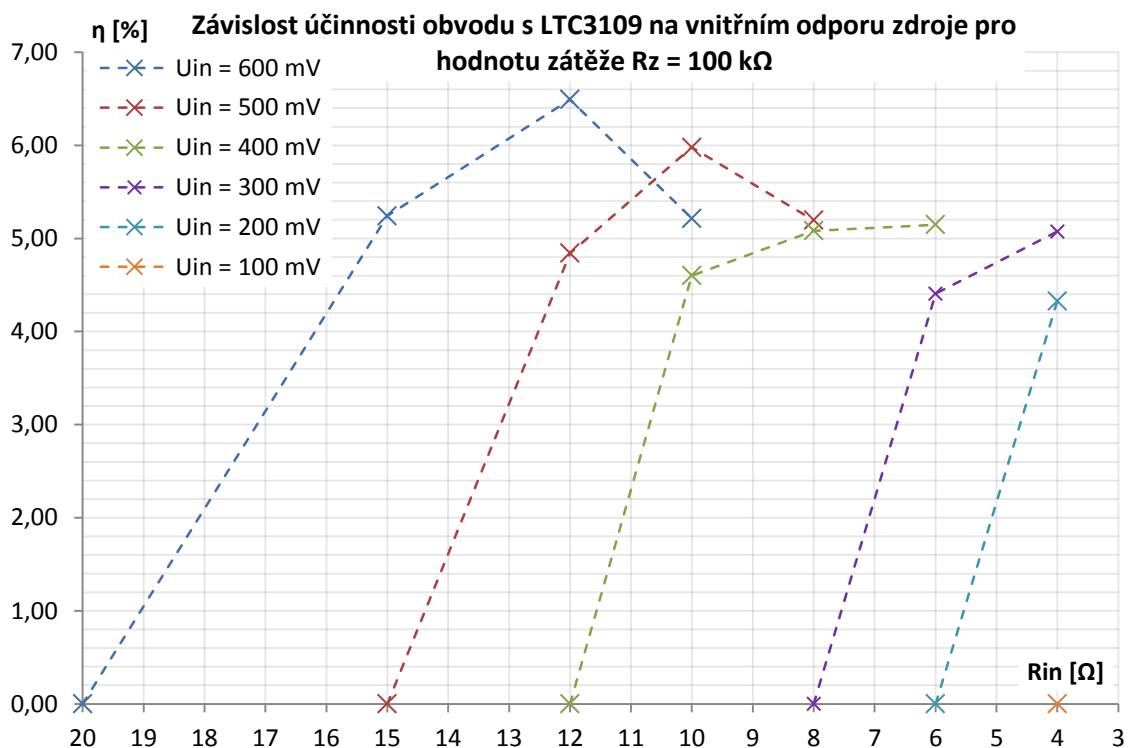
Obrázek 6 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 50\text{ k}\Omega$



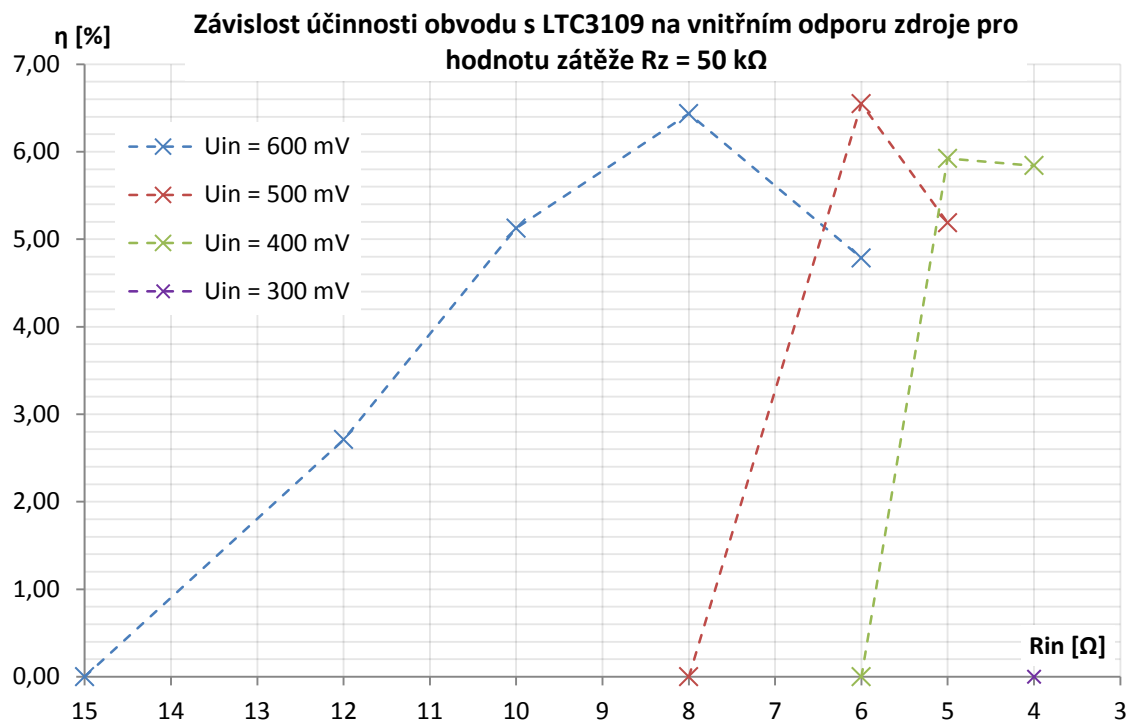
Obrázek 7 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 20\text{ k}\Omega$



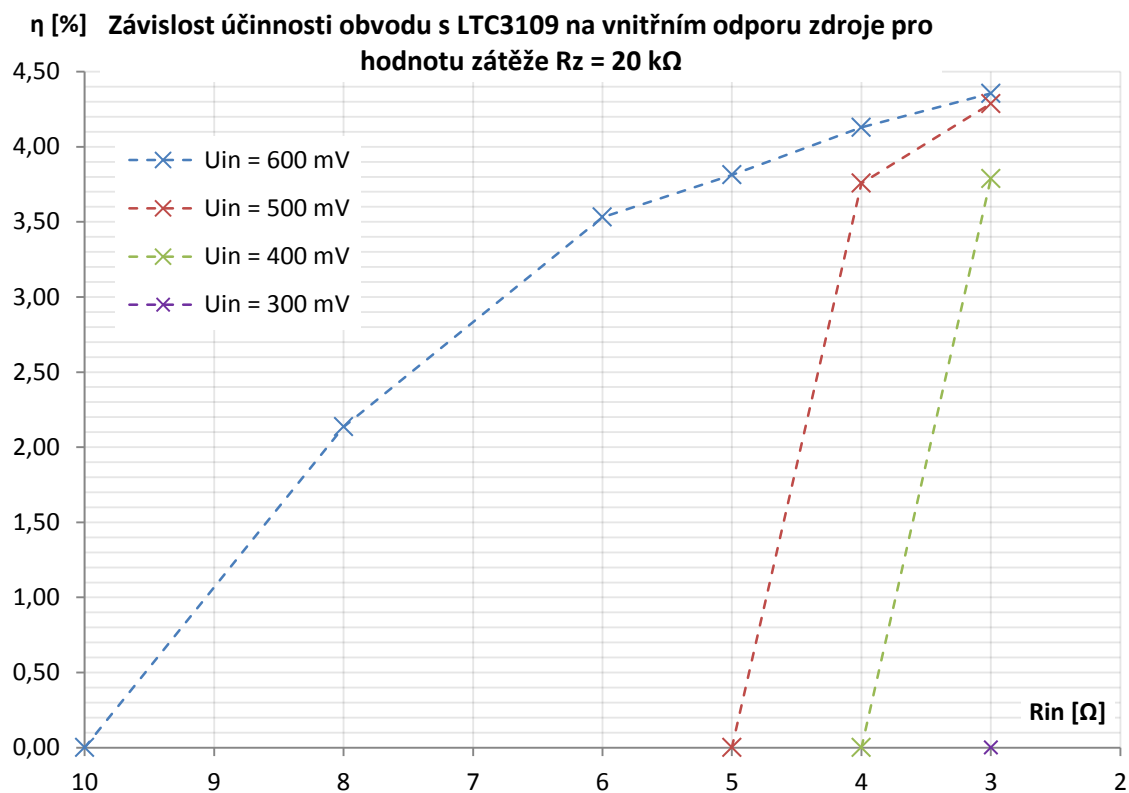
Obrázek 8 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$



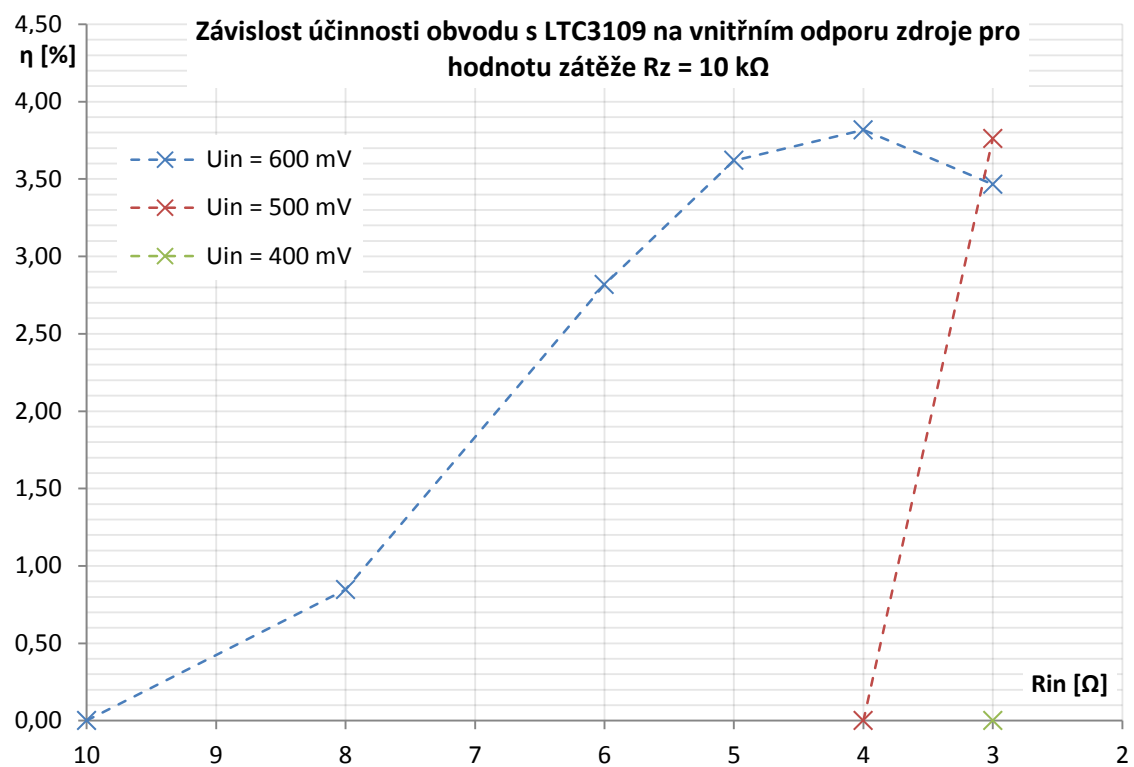
Obrázek 9 - Závislost účinnosti obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100\text{ k}\Omega$



Obrázek 10 - Závislost účinnosti obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 50\text{ k}\Omega$



Obrázek 11 - Závislost účinnosti obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 20\text{ k}\Omega$



Obrázek 12 - Závislost účinnosti obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$

Příloha 3 – Tabulky závislostí obvodu Seiko

Tabulka 5 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100 \text{ k}\Omega$

$R_z = 100 \text{ k}\Omega$					
$U_{IN} [\text{mV}]$	$R_{IN} [\Omega]$	$U_{IN2} [\text{mV}]$	$U_z [\text{V}]$	$P_z [\mu\text{W}]$	$\eta [\%]$
300,9	100	-	0,000	0,0	0,00
300,8	90	45,87	1,685	28,4	21,85
300,8	80	49,89	1,907	36,4	23,24
300,8	70	55,14	2,196	48,2	24,92
300,8	60	61,86	2,550	65,0	26,40
300,8	50	70,47	2,999	89,9	27,71
300,8	40	259,20	3,020	91,2	33,83
400,3	140	-	0,000	0,0	0,00
400,3	130	44,65	1,614	26,0	21,33
400,3	120	47,31	1,765	31,2	22,38
400,3	110	50,55	1,939	37,6	23,39
400,3	100	54,48	2,159	46,6	24,74
400,2	90	59,05	2,401	57,6	25,75
400,2	80	64,77	2,698	72,8	26,80
400,4	70	348,50	3,020	91,2	35,30
500,1	180	-	0,000	0,0	0,00
500,1	170	40,77	1,515	23,0	20,84
500,1	160	46,04	1,690	28,6	21,86
500,1	150	48,28	1,817	33,0	22,70
500,1	140	51,00	1,961	38,5	23,51
500,0	130	54,13	2,138	45,7	24,62
500,0	120	57,76	2,331	54,3	25,53
500,0	110	61,99	2,553	65,2	26,41
500,0	100	66,95	2,809	78,9	27,22
500,1	90	449,00	3,020	91,2	35,78
600,7	200	-	0,000	0,0	0,00
600,7	190	44,85	1,623	26,3	20,08
600,7	180	46,61	1,722	29,7	20,67
600,7	170	48,58	1,832	33,6	21,27
600,7	160	50,86	1,953	38,1	21,82
600,7	150	53,41	2,100	44,1	22,63
600,7	140	56,34	2,255	50,9	23,21
600,7	130	59,63	2,429	59,0	23,77
600,7	120	63,38	2,625	68,9	24,28
600,6	110	67,64	2,845	80,9	24,70
600,8	100	551,20	3,020	91,2	33,36

Tabulka 6 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 50 \text{ k}\Omega$

$R_z = 50 \text{ k}\Omega$					
$U_{IN} [\text{mV}]$	$R_{IN} [\Omega]$	$U_{IN2} [\text{mV}]$	$U_z [\text{V}]$	$P_z [\mu\text{W}]$	$\eta [\%]$
300,3	70	-	0,000	0,0	0,00
300,3	60	55,22	1,704	58,1	25,75
300,3	50	61,41	1,975	78,0	26,59
300,2	40	70,05	2,350	110,5	27,40
300,1	30	81,59	2,831	160,3	26,97
300,4	20	249,20	3,020	182,4	28,59
400,2	100	-	0,000	0,0	0,00
400,1	90	55,65	1,724	59,4	27,91
400,1	80	60,17	1,922	73,9	28,90
400,1	70	65,76	2,167	93,9	29,90
400,1	60	72,78	2,464	121,4	30,58
400,0	50	81,78	2,838	161,1	30,95
400,3	40	343,00	3,020	182,4	37,12
500,0	150	-	0,000	0,0	0,00
500,0	140	46,17	1,454	42,3	28,25
500,0	130	55,12	1,698	57,7	30,57
500,0	120	58,46	1,847	68,2	31,72
500,0	110	62,48	2,019	81,5	32,81
499,9	100	67,26	2,230	99,5	34,18
499,9	90	68,98	2,305	106,3	32,17
499,8	80	75,15	2,562	131,3	32,91
499,8	70	82,63	2,872	165,0	33,50
500,1	60	441,35	3,020	182,4	42,21
599,9	170	-	0,000	0,0	0,00
599,8	160	53,10	1,610	51,8	28,57
599,8	150	55,75	1,727	59,7	29,50
599,7	140	58,59	1,852	68,6	30,29
599,7	130	61,91	1,994	79,5	31,05
599,7	120	65,74	2,166	93,8	32,08
599,7	110	70,22	2,355	110,9	32,82
599,7	100	75,48	2,575	132,6	33,51
599,8	90	537,60	3,020	182,4	49,09

Tabulka 7 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 20\text{ k}\Omega$

$R_z = 20\text{ k}\Omega$					
$U_{IN} [\text{mV}]$	$R_{IN} [\Omega]$	$U_{IN2} [\text{mV}]$	$U_z [\text{V}]$	$P_z [\mu\text{W}]$	$\eta [\%]$
300,2	60	-	0,000	0,0	0,00
300,2	50	72,35	1,618	130,9	39,70
300,1	40	84,08	1,966	193,3	42,56
300,0	30	100,28	2,453	300,9	45,07
300,1	20	219,70	3,020	456,0	51,63
400,0	80	-	0,000	0,0	0,00
399,9	70	74,74	1,686	142,1	40,94
399,9	60	83,50	1,949	189,9	43,13
399,9	50	94,70	2,288	261,7	45,28
399,8	40	110,11	2,740	375,4	47,07
400,1	30	324,70	3,020	456,0	55,88
500,7	100	-	0,000	0,0	0,00
500,6	90	76,29	1,732	150,0	41,70
500,6	80	83,31	1,943	188,8	43,44
500,6	70	91,87	2,203	242,7	45,24
500,6	60	102,82	2,527	319,3	46,84
500,5	50	117,12	2,945	433,7	48,29
500,7	40	427,98	3,020	456,0	58,61
600,5	120	-	0,000	0,0	0,00
600,5	110	72,51	1,623	131,7	37,84
600,5	100	78,18	1,788	159,8	39,14
600,3	90	88,88	2,114	223,4	44,24
600,3	80	97,21	2,361	278,7	45,59
600,2	70	107,47	2,663	354,6	46,87
600,5	60	509,80	3,020	456,0	59,17

Tabulka 8 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$

$R_z = 10\text{ k}\Omega$					
$U_{IN} [\text{mV}]$	$R_{IN} [\Omega]$	$U_{IN2} [\text{mV}]$	$U_z [\text{V}]$	$P_z [\mu\text{W}]$	$\eta [\%]$
300,0	40	-	0,000	0,0	0,00
300,0	30	98,9	1,698	288,3	43,49
300,0	25	109,8	1,932	373,3	44,68
299,9	20	124,5	2,255	508,5	46,58
299,9	15	140,1	2,595	673,4	45,12
299,8	12	154,4	2,905	843,9	45,11
300,0	10	206,1	3,020	912,0	47,13
400,0	60	-	0,000	0,0	0,00
400,0	50	94,2	1,602	256,6	44,54
399,9	40	110,4	1,946	378,7	47,38
399,9	30	131,7	2,414	582,7	49,49
399,9	25	144,9	2,701	729,5	49,36
400,0	20	283,9	3,020	912,0	55,34
500,7	70	-	0,000	0,0	0,00
500,7	60	103,2	1,789	320,1	46,81
500,6	50	117,5	2,104	442,7	49,17
500,6	40	136,2	2,512	631,0	50,85
500,7	30	381,2	3,020	912,0	60,06
600,5	90	-	0,000	0,0	0,00
600,5	80	98,6	1,692	286,3	46,28
600,5	70	109,7	1,929	372,1	48,37
600,4	60	122,7	2,218	492,0	50,36
600,2	50	139,4	2,581	666,2	51,85
600,5	40	479,6	3,020	912,0	62,92

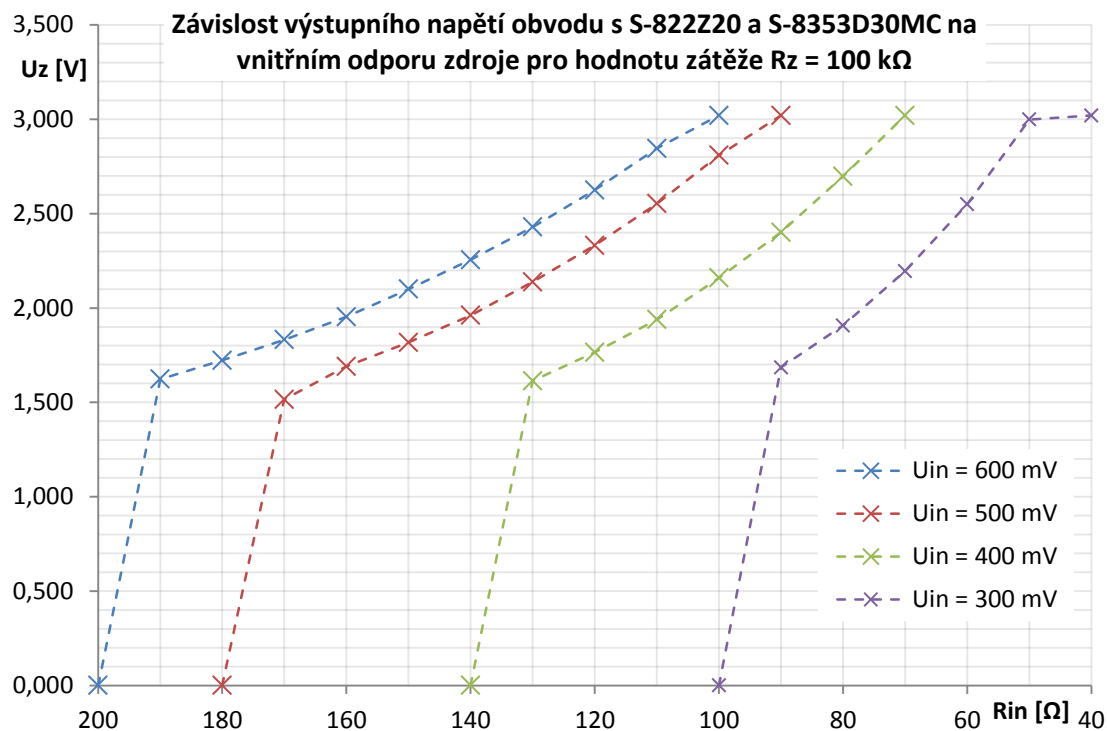
Tabulka 9 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu
s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 5 \text{ k}\Omega$

$R_z = 5 \text{ k}\Omega$					
$U_{IN} [\text{mV}]$	$R_{IN} [\Omega]$	$U_{IN2} [\text{mV}]$	$U_z [\text{V}]$	$P_z [\mu\text{W}]$	$\eta [\%]$
300,2	20	-	0,000	0,0	0,00
299,9	15	139,4	1,806	652,3	43,73
299,9	12	154,2	2,043	834,8	44,59
299,9	10	163,2	2,190	959,2	43,00
400,0	40	-	0,000	0,0	0,00
399,9	30	130,1	1,650	544,5	46,54
399,8	25	144,2	1,883	709,1	48,10
399,8	20	162,3	2,176	947,0	49,14
399,7	15	185,1	2,535	1285,2	48,53
399,6	12	202,2	2,803	1571,4	47,24
399,7	10	242,4	3,020	1824,1	47,84
500,6	50	-	0,000	0,0	0,00
500,6	40	136,0	1,749	611,8	49,36
500,5	30	162,2	2,174	945,3	51,68
500,5	25	180,8	2,467	1217,2	52,65
500,4	20	201,1	2,786	1552,4	51,58
500,5	15	372,3	3,020	1824,1	57,33
600,4	60	-	0,000	0,0	0,00
600,3	50	140,2	1,819	661,8	51,29
600,3	40	162,9	2,185	954,8	53,60
600,2	30	195,5	2,698	1455,8	55,21
600,3	25	433,6	3,020	1824,1	63,09

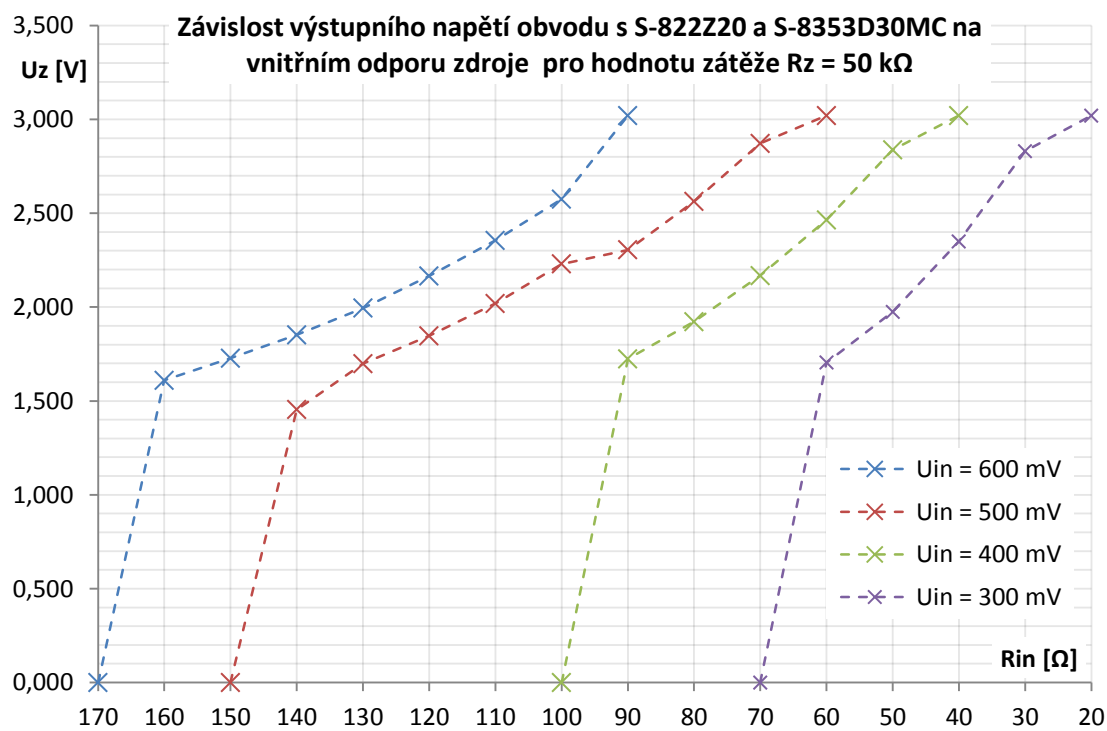
Tabulka 10 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 2\text{ k}\Omega$

$R_z = 2\text{ k}\Omega$					
$U_{IN} [\text{mV}]$	$R_{IN} [\Omega]$	$U_{IN2} [\text{mV}]$	$U_z [\text{V}]$	$P_z [\mu\text{W}]$	$\eta [\%]$
399,8	20	-	0,000	0,0	0,00
399,8	15	188,0	1,593	1268,8	47,80
399,7	12	200,3	1,729	1494,7	44,91
399,6	10	221,1	1,948	1897,4	48,08
500,4	30	-	0,000	0,0	0,00
500,4	25	167,7	1,437	1032,5	46,26
500,4	20	204,7	1,775	1575,3	52,05
500,4	15	234,1	2,086	2175,7	52,35
500,4	12	255,7	2,314	2677,3	51,35
500,3	10	267,9	2,442	2981,7	47,89
600,4	40	-	0,000	0,0	0,00
600,3	30	192,3	1,641	1346,4	51,48
600,3	25	216,1	1,895	1795,5	54,07
600,2	20	244,2	2,193	2404,6	55,32
600,1	15	278,5	2,552	3256,4	54,54
600,0	12	307,1	2,849	4058,4	54,14
599,9	10	390,4	3,020	4560,2	55,76

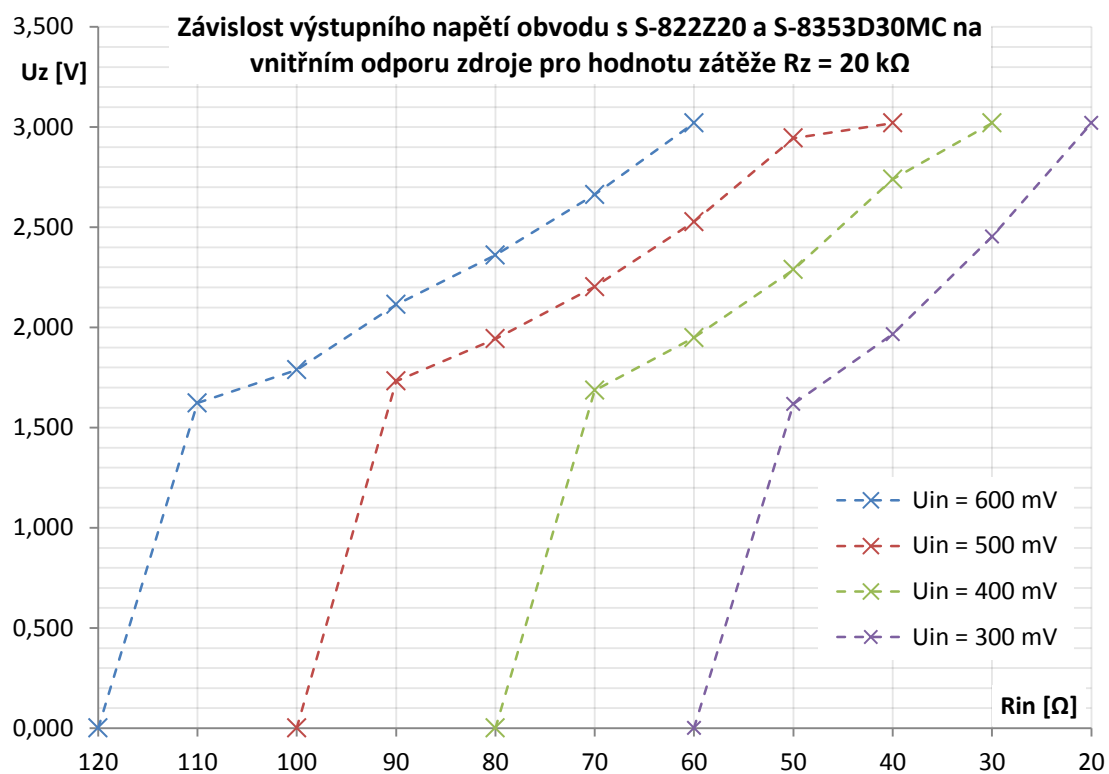
Příloha 4 - Grafy závislostí obvodu Seiko



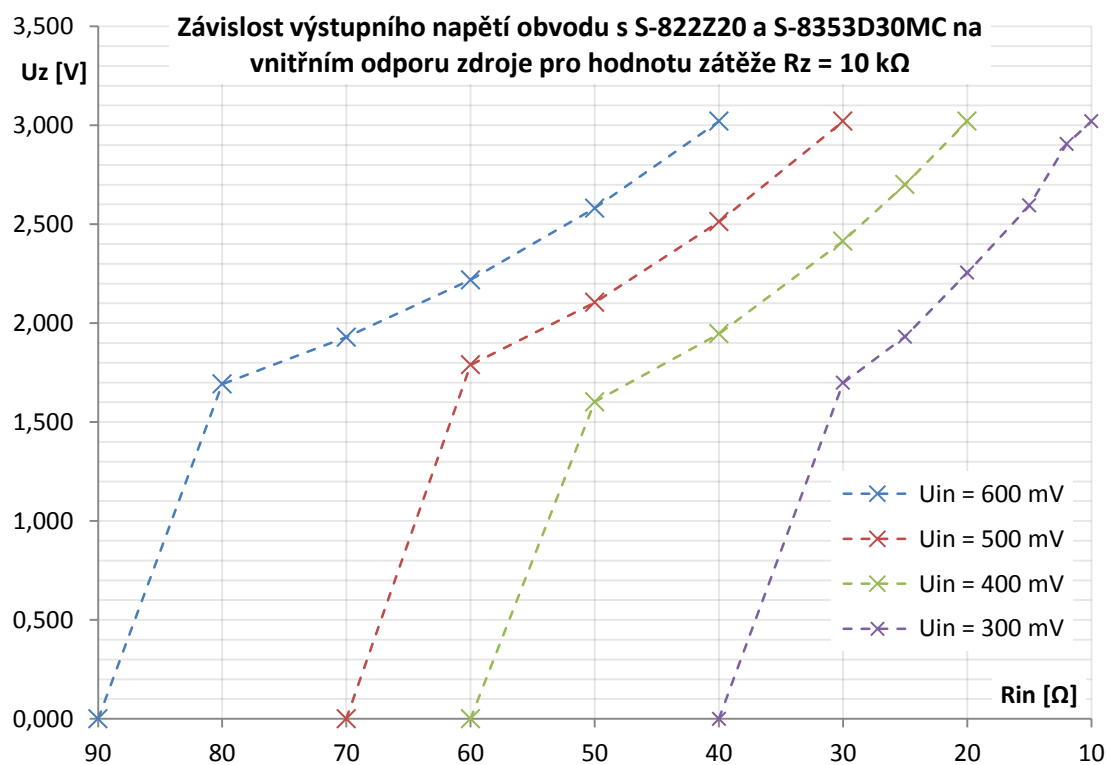
Obrázek 13 - Závislost výstupního napětí obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100\text{ k}\Omega$



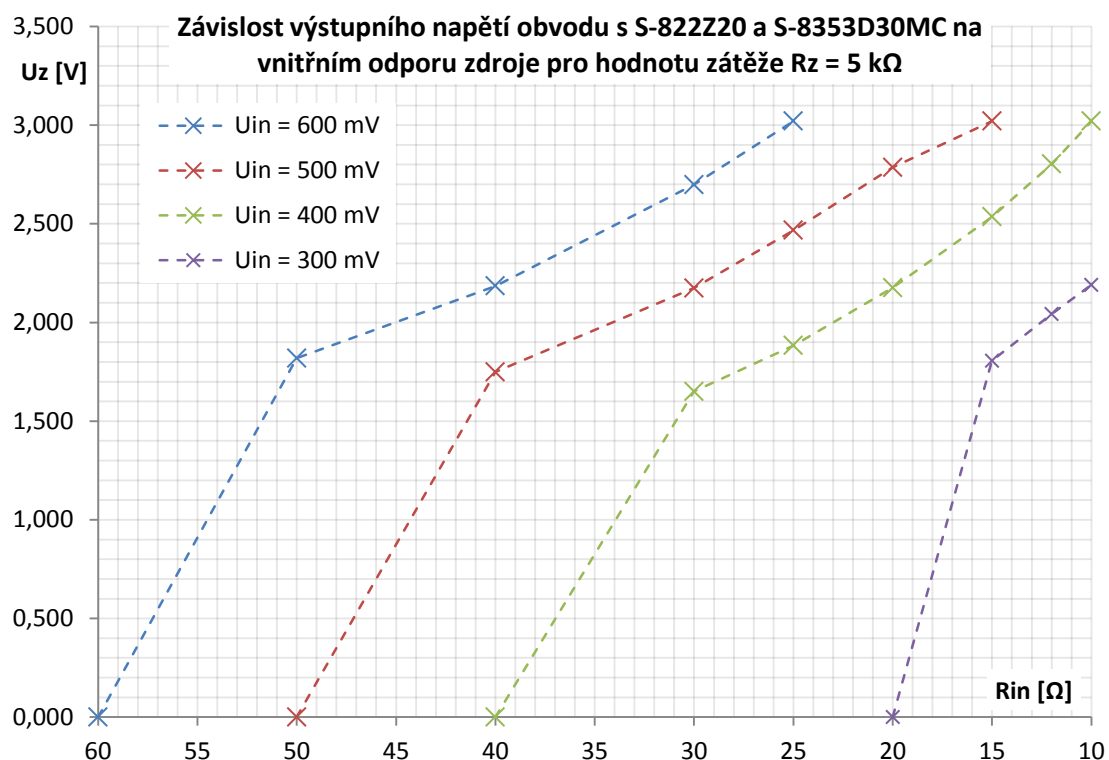
Obrázek 14 - Závislost výstupního napětí obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 50\text{ k}\Omega$



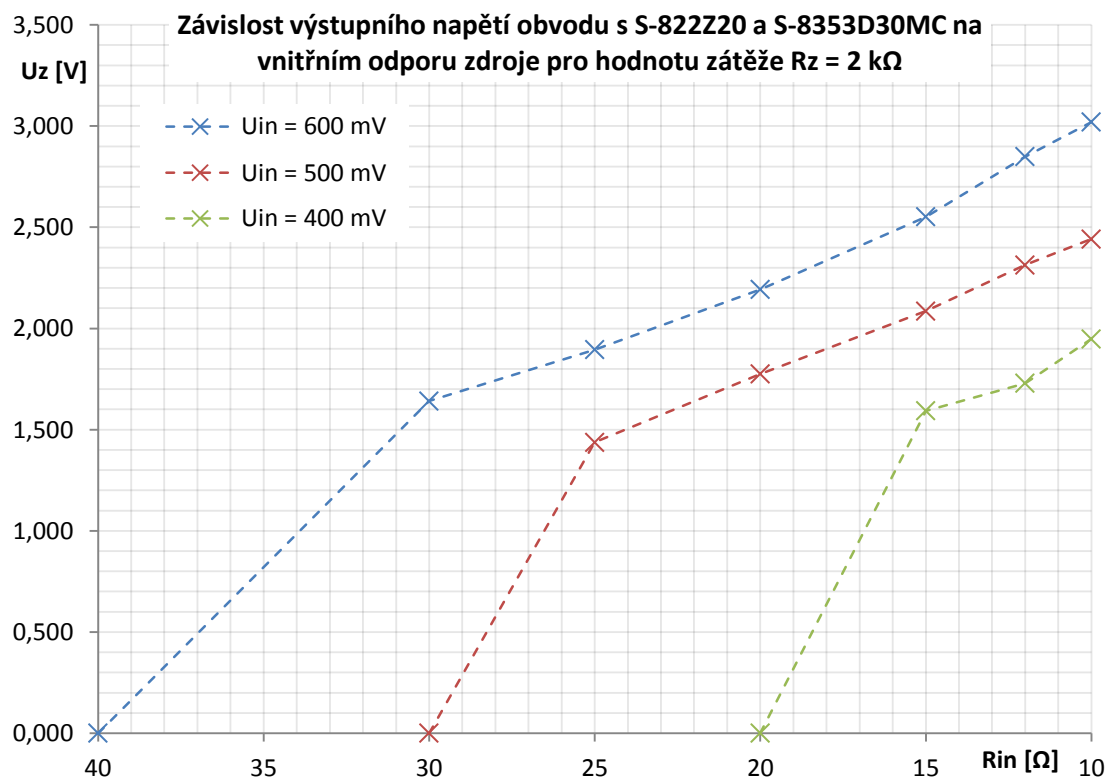
Obrázek 15 - Závislost výstupního napětí obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 20\text{ k}\Omega$



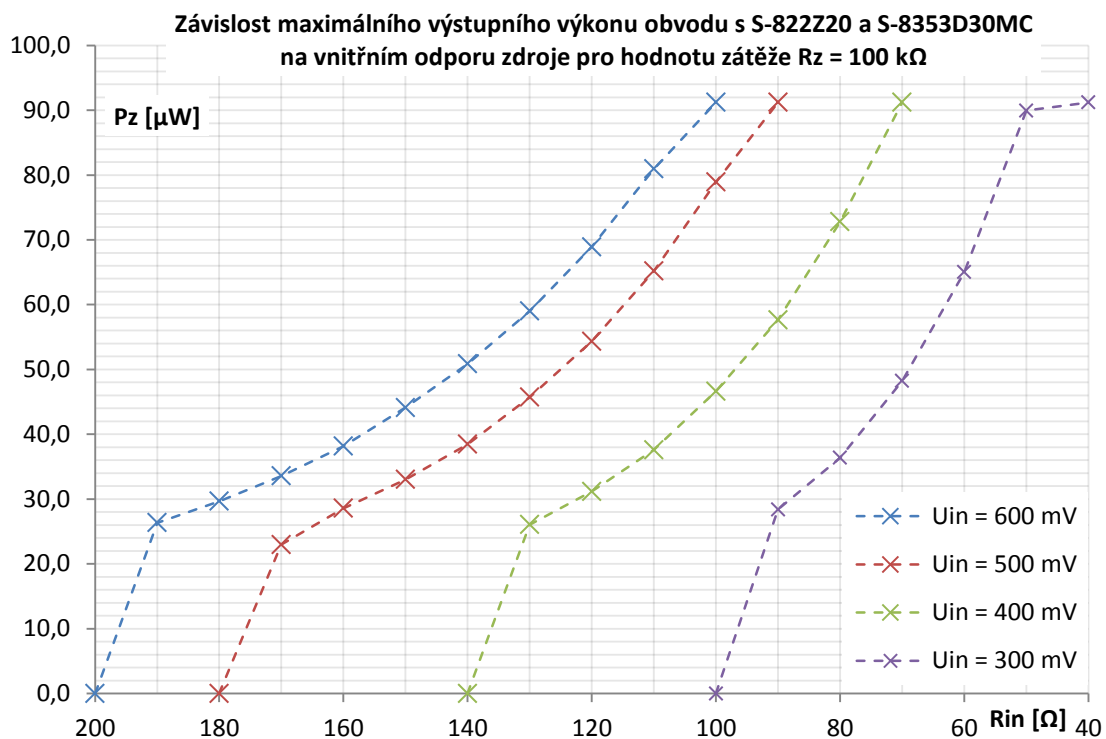
Obrázek 16 - Závislost výstupního napětí obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$



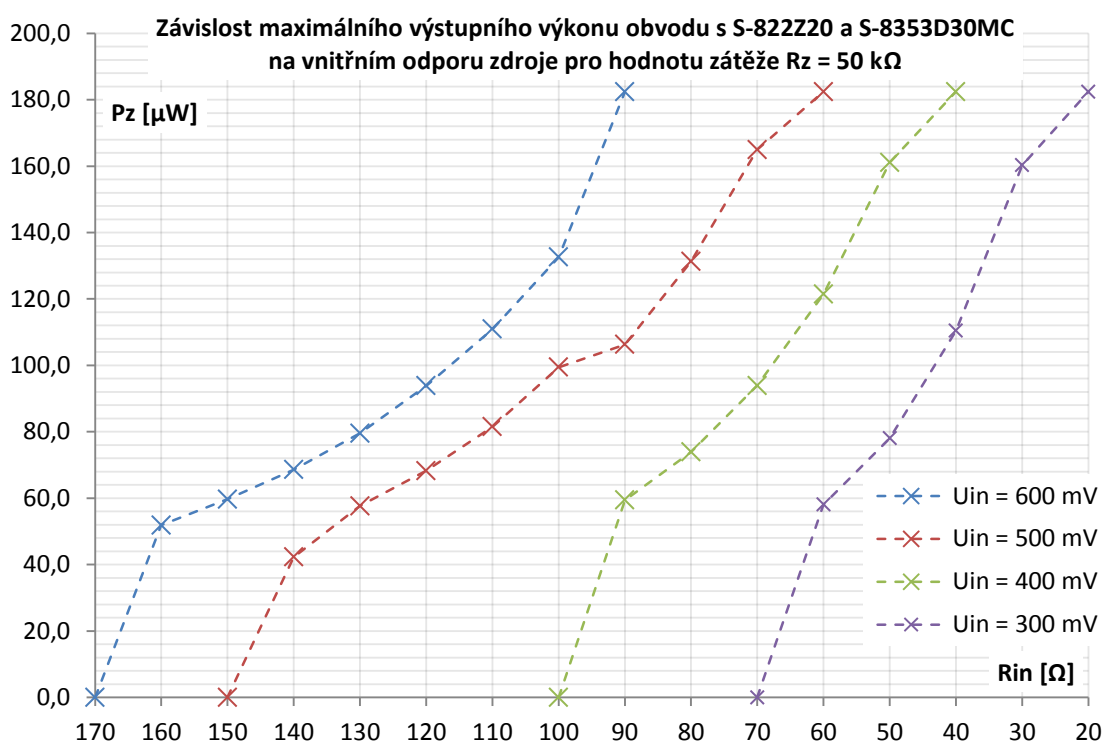
Obrázek 17 - Závislost výstupního napětí obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 5\text{ k}\Omega$



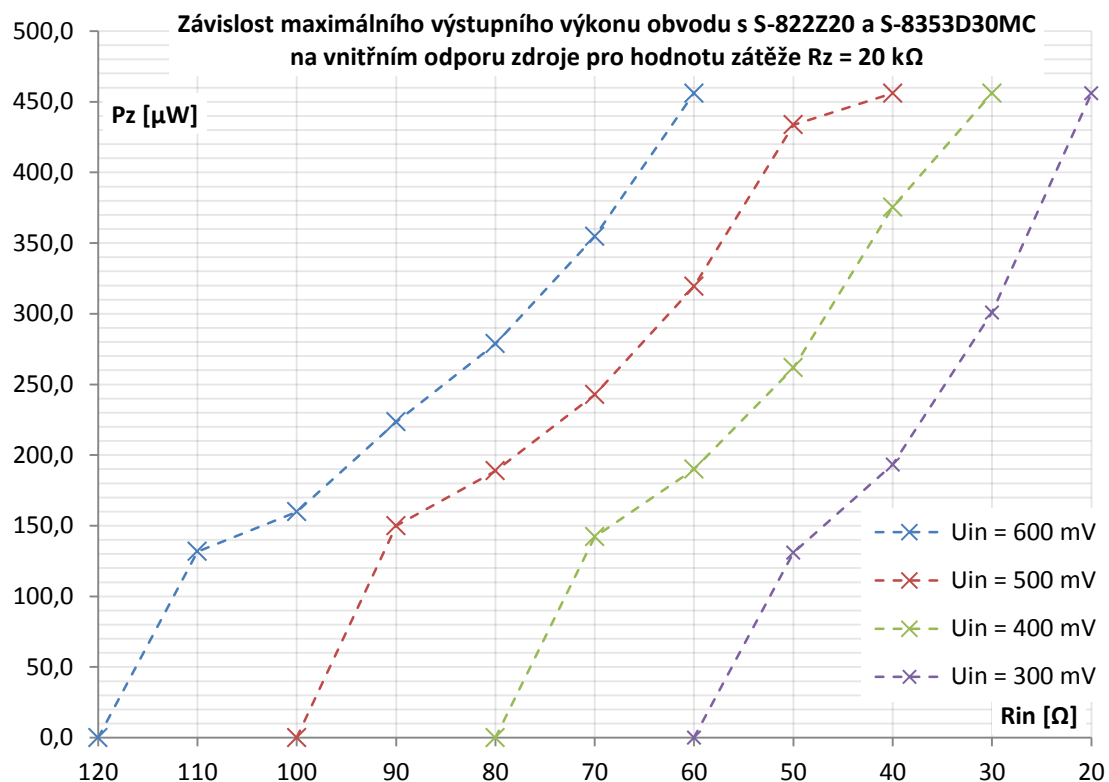
Obrázek 18 - Závislost výstupního napětí obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 2\text{ k}\Omega$



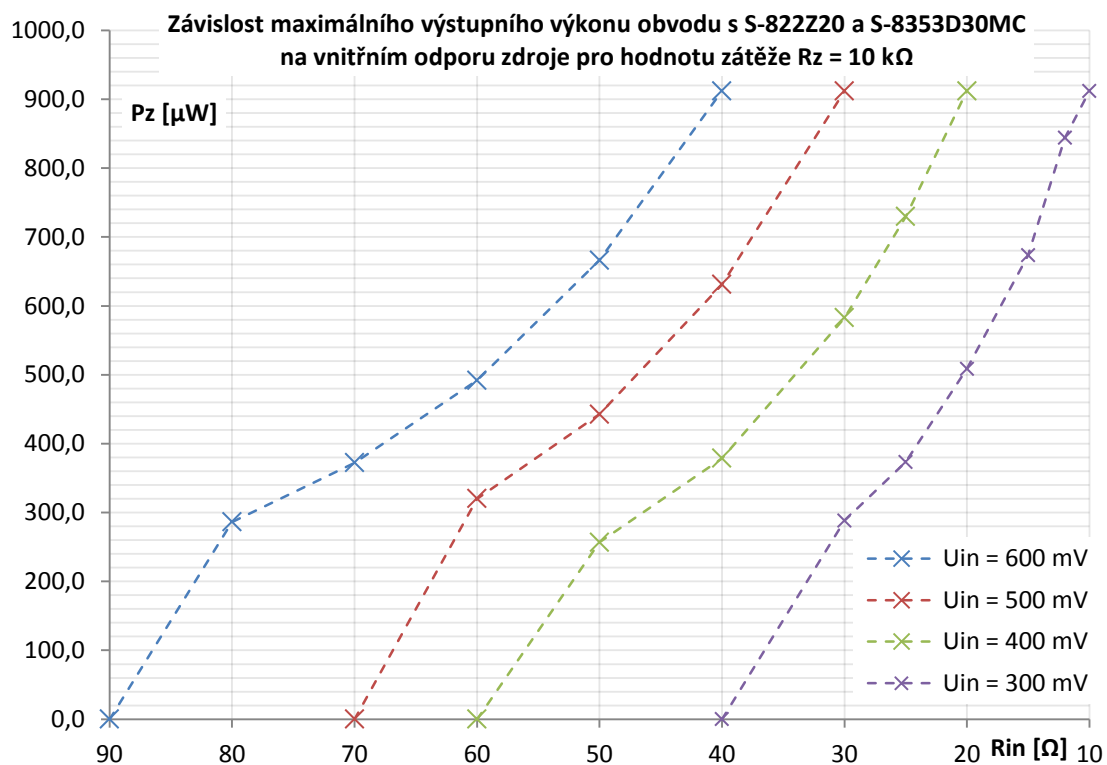
Obrázek 19 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC
na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100\text{ k}\Omega$



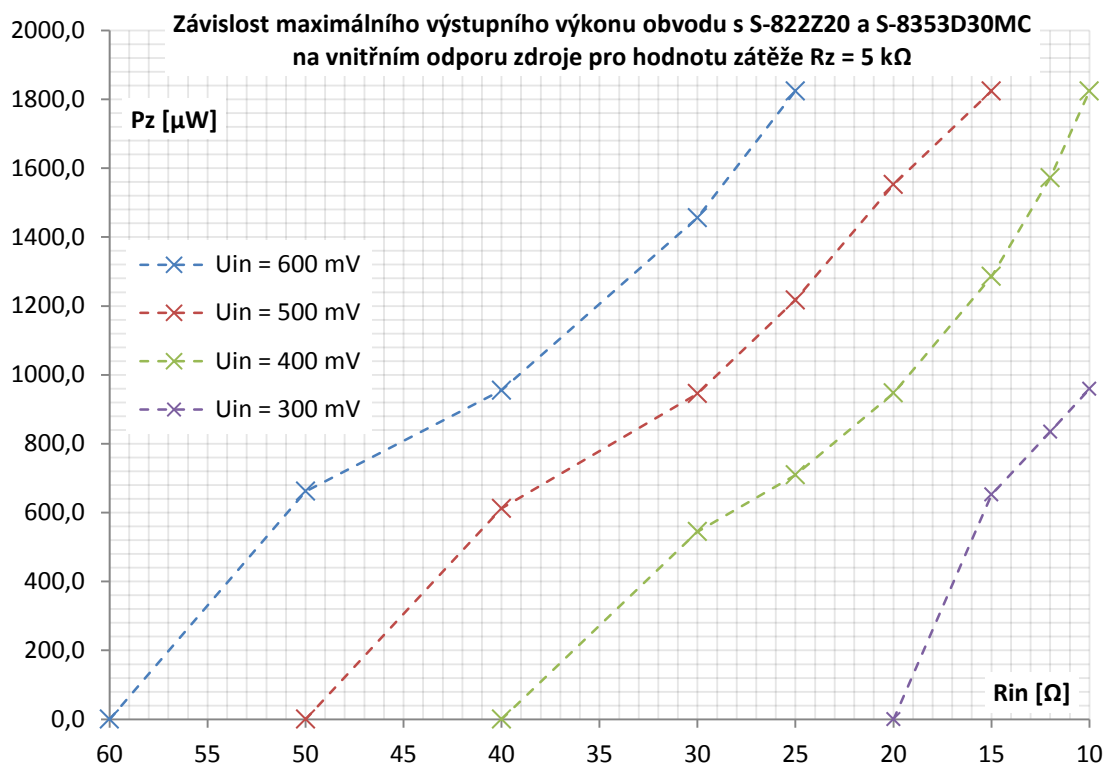
Obrázek 20 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC
na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 50\text{ k}\Omega$



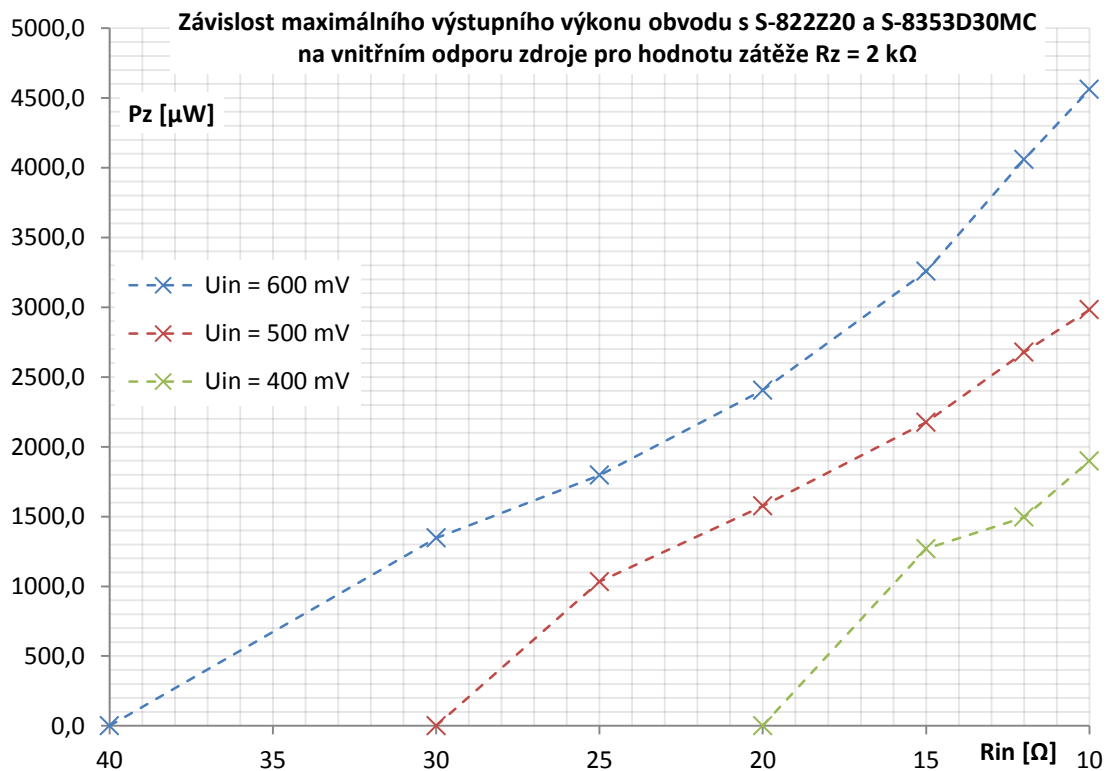
Obrázek 21 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 20\text{ k}\Omega$



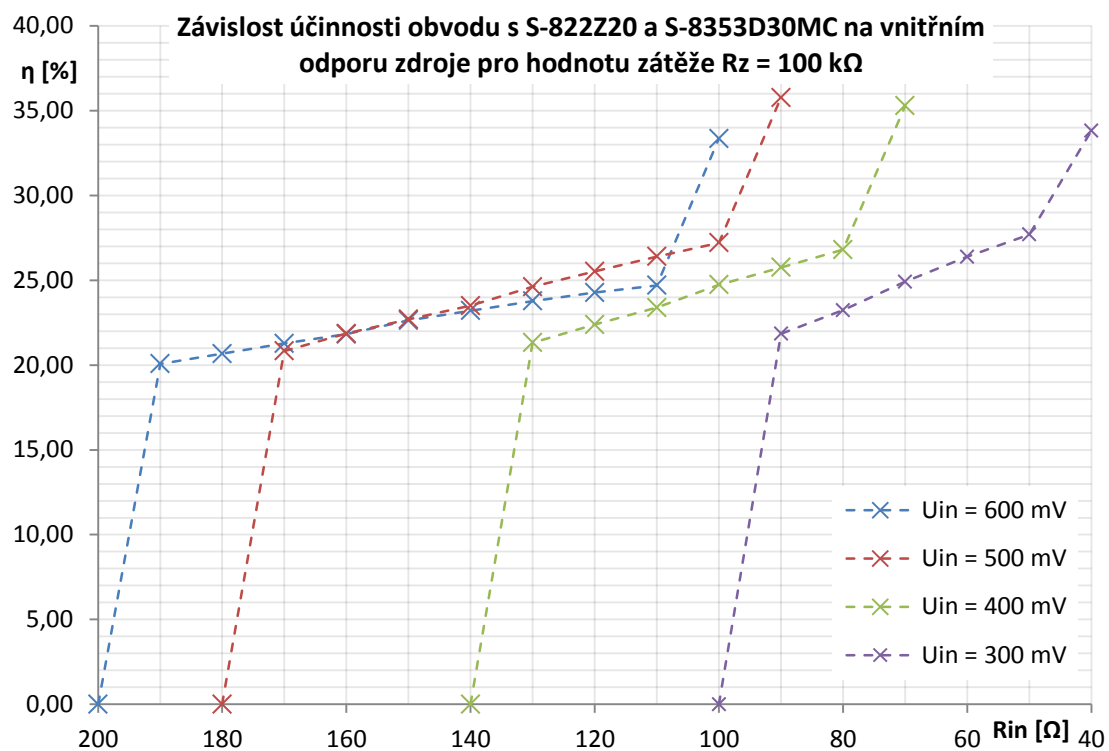
Obrázek 22 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$



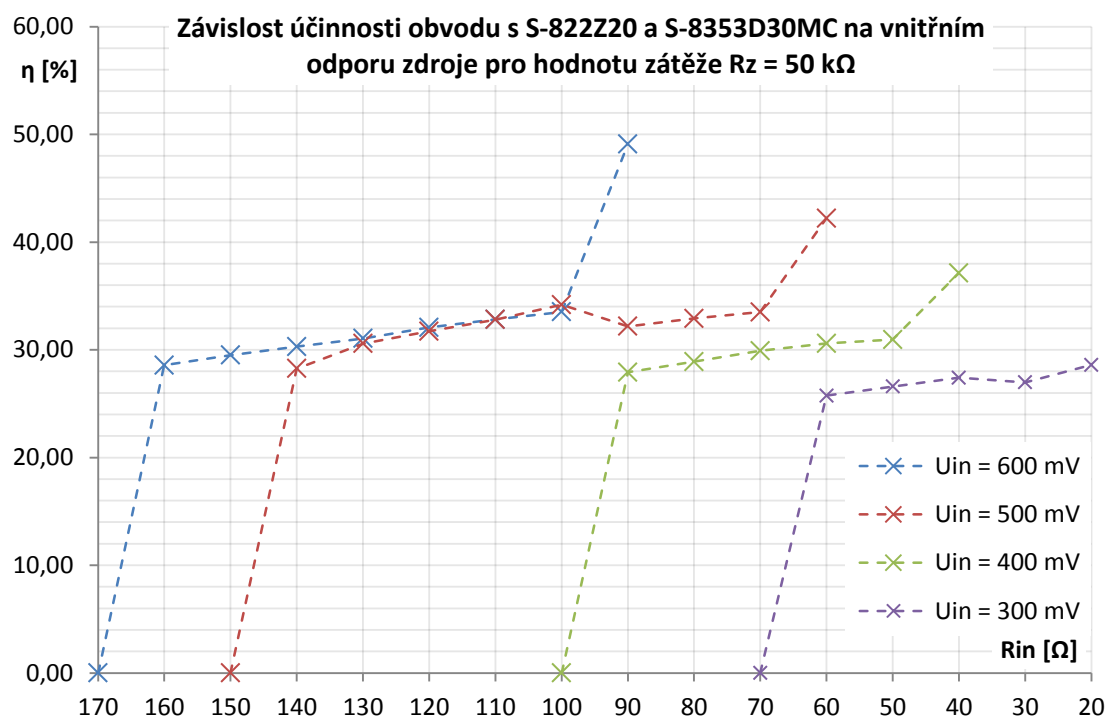
Obrázek 23 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 5\text{ k}\Omega$



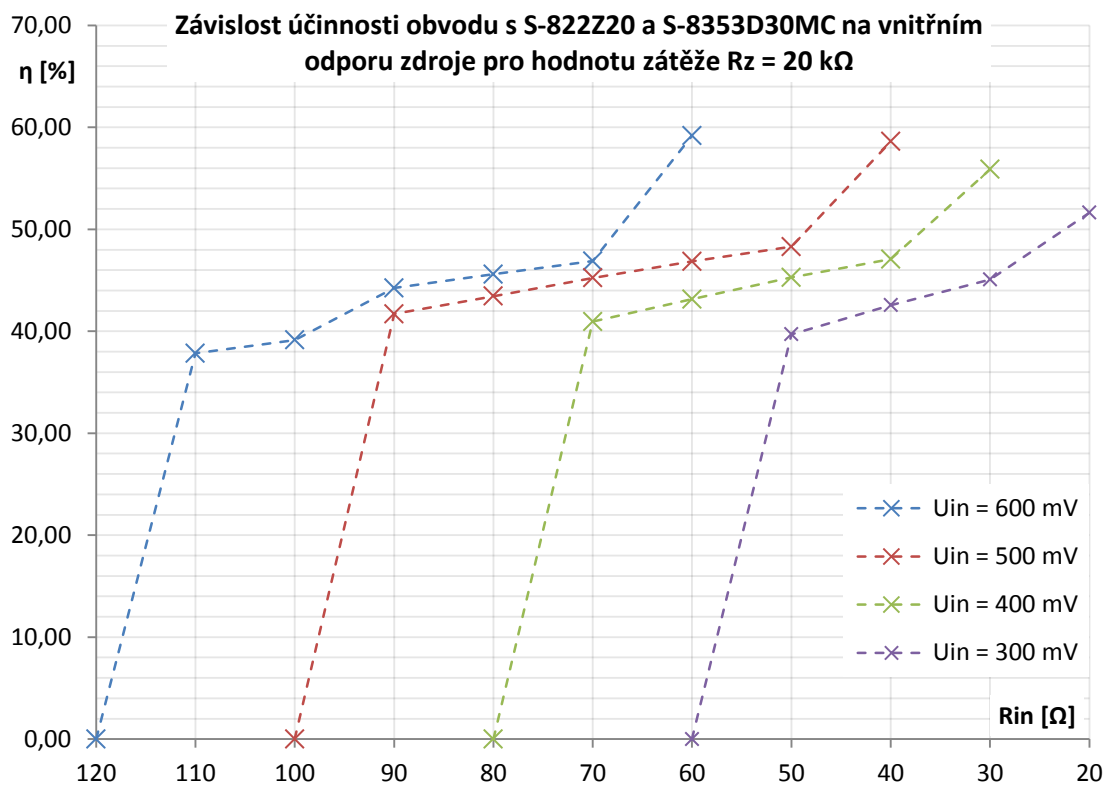
Obrázek 24 - Závislost maximálního výstupního výkonu obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 2\text{ k}\Omega$



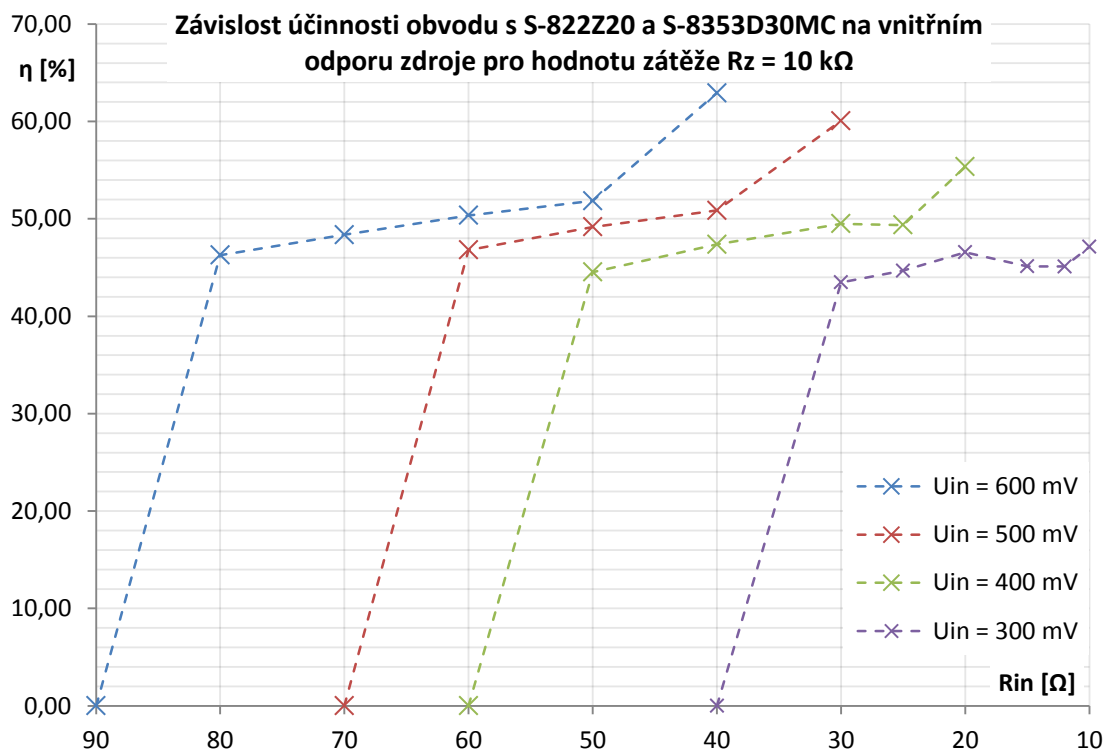
Obrázek 25 - Závislost účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 100\text{ k}\Omega$



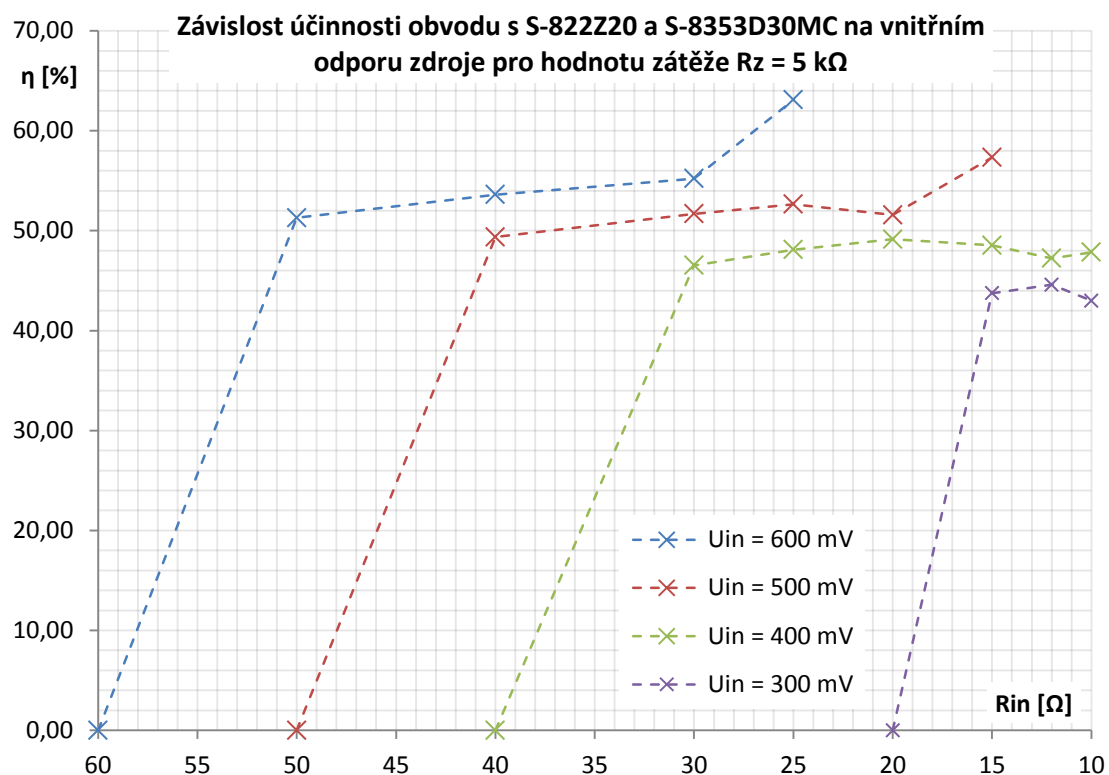
Obrázek 26 - Závislost účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 50\text{ k}\Omega$



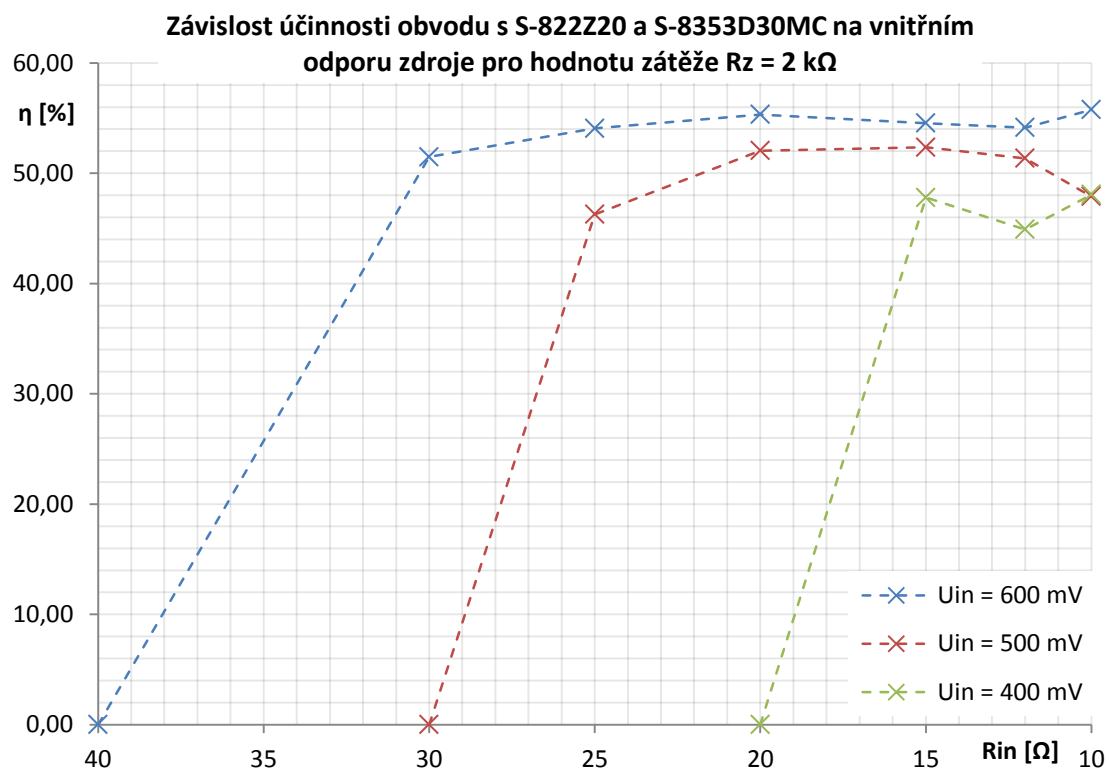
Obrázek 27 - Závislost účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 20\text{ k}\Omega$



Obrázek 28 - Závislost účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 10\text{ k}\Omega$



Obrázek 29 - Závislost účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 5\text{ k}\Omega$



Obrázek 30 - Závislost účinnosti obvodu s S-822Z20 a S-8353D30MC na vnitřním odporu zdroje pro hodnotu zátěže $R_z = 2\text{ k}\Omega$

Příloha 5 - Tabulky závislostí upraveného obvodu LTC3109

Tabulka 11 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti upraveného obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro transformátor s poměrem 1:10

LTC v unipolárním zapojení - převod transformátoru 1:10							
R_z [k Ω]	U_{IN} [mV]	R_{IN} [Ω]	U_{IN2} [mV]	P_{IN} [μ W]	U_z [V]	P_z [μ W]	η [%]
1	600,1	8	133,5	7784,3	0	0,0	0,00
1	599,9	7	199,9	11422,9	1,82	3312,4	29,00
1	600,0	6	212,5	13724,0	2,06	4243,6	30,92
1	599,8	5	233,0	17092,9	2,4	5760,0	33,70
1	600,2	4	255,7	22022,2	2,7	7290,0	33,10
1	600,1	3	276,0	29817,2	2,97	8820,9	29,58
1	599,4	2	321,7	44668,0	3,3	10890,0	24,38
2	601,0	8	134,1	7826,4	0	0,0	0,00
2	601,0	7	200,5	11471,5	3,12	4867,2	42,43
2	601,0	6	208,1	13627,1	3,3	5445,0	39,96
5	600,2	8	134,0	7808,9	0	0,0	0,00
5	600,2	7	207,2	11632,8	3,3	2178,0	18,72
10	600,2	8	134,2	7817,2	0	0,0	0,00
10	600,2	7	206,5	11614,2	3,3	1089,0	9,38
20	600,2	8	134,5	7829,6	0	0,0	0,00
20	600,2	7	206,4	11611,5	3,3	544,5	4,69
50	600,1	8	133,2	7773,9	0	0,0	0,00
50	600,3	7	203,6	11538,3	3,3	217,8	1,89
100	600,3	8	134,1	7814,7	0	0,0	0,00
100	600,3	7	207,9	11654,3	3,3	108,9	0,93

Tabulka 12 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti upraveného obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro transformátor s poměrem 1:20

LTC v unipolárním zapojení - převod transformátoru 1:20							
R_z [k Ω]	U_{IN} [mV]	R_{IN} [Ω]	U_{IN2} [mV]	P_{IN} [μ W]	U_z [V]	P_z [μ W]	η [%]
1	599,9	18	59,4	1783,7	0,00	0,0	0,00
1	599,9	17	85,6	2589,7	0,50	251,0	9,69
1	600,8	15	91,8	3115,1	0,59	351,6	11,29
1	600,8	12	102,5	4256,3	0,76	573,0	13,46
1	600,7	10	112,3	5484,7	0,91	826,3	15,07
1	600,5	8	127,1	7521,1	1,14	1295,0	17,22
1	600,2	6	146,6	11083,0	1,43	2044,9	18,45
1	599,8	4	179,8	18879,0	1,89	3560,8	18,86
1	600,1	3	213,5	27513,0	2,30	5285,4	19,21
1	600,8	2	259,3	44275,5	2,77	7695,1	17,38
1	600,5	1	315,2	89926,6	3,30	10890,0	12,11
2	600,9	18	59,3	1784,3	0,00	0,0	0,00
2	600,9	17	85,9	2602,3	1,01	510,1	19,60
2	600,9	15	91,3	3101,8	1,17	683,3	22,03
2	600,8	12	102,2	4246,4	1,50	1122,0	26,42
2	600,7	10	112,5	5492,3	1,82	1647,1	29,99
2	600,5	8	126,4	7490,8	2,24	2506,6	33,46
2	600,2	6	143,4	10917,5	2,71	3672,1	33,63
2	600,1	5	158,2	13981,7	3,08	4737,0	33,88
2	600,5	4	174,7	18596,8	3,30	5445,0	29,28
3	601,0	18	59,1	1779,2	0,00	0,0	0,00
3	600,9	17	85,8	2599,7	1,50	753,0	28,96
3	600,9	15	91,2	3099,0	1,74	1011,5	32,64
3	600,7	12	102,0	4239,0	2,23	1659,1	39,14
3	600,6	10	113,1	5513,6	2,68	2397,7	43,49
3	600,5	8	125,6	7455,9	3,11	3222,0	43,21
3	600,4	7	134,9	8970,9	3,30	3630,0	40,46
5	600,9	18	59,1	1778,9	0,00	0,0	0,00
5	601,0	17	85,9	2602,8	2,48	1231,1	47,30
5	600,2	15	91,7	3108,6	2,78	1549,0	49,83
5	600,3	13	98,5	3802,1	3,10	1919,5	50,49
5	600,3	12	101,8	4228,9	3,25	2116,4	50,05
5	600,2	11	107,1	4801,0	3,30	2178,0	45,37
10	600,6	18	59,2	1780,6	0,00	0,0	0,00
10	600,6	17	87,1	2630,9	3,30	1089,0	41,39
20	600,7	18	59,3	1783,6	0,00	0,0	0,00
20	600,7	17	88,7	2671,4	3,30	544,5	20,38
50	600,4	18	59,2	1779,9	0,00	0,0	0,00
50	600,4	17	88,9	2674,8	3,30	217,8	8,14
100	600,6	18	59,2	1780,6	0,00	0,0	0,00
100	600,6	17	88,7	2670,9	3,30	108,9	4,08

Tabulka 13 - Závislosti výstupního napětí, maximálního výstupního výkonu a účinnosti upraveného obvodu s LTC3109 na vnitřním odporu zdroje pro transformátor s poměrem 1:50

LTC v unipolárním zapojení - převod transformátoru 1:50							
R_z [k Ω]	U_{IN} [mV]	R_{IN} [Ω]	U_{IN2} [mV]	P_{IN} [μ W]	U_z [V]	P_z [μ W]	η [%]
1	600,1	50	22,0	254,4	0,00	0,0	0,00
1	600,0	40	33,0	467,8	0,08	5,8	1,23
1	601,0	30	37,8	709,6	0,12	13,7	1,93
1	600,9	20	46,8	1296,6	0,20	39,2	3,02
1	600,7	15	55,6	2020,5	0,28	76,7	3,80
1	600,4	10	73,9	3890,8	0,44	190,1	4,89
1	601,0	8	87,3	5605,8	0,55	297,0	5,30
1	600,7	6	110,5	9027,9	0,73	530,0	5,87
1	600,3	4	140,7	16166,4	0,98	950,6	5,88
1	600,0	3	174,0	24708,0	1,24	1547,5	6,26
1	600,5	2	206,8	40708,6	1,48	2202,3	5,41
2	600,1	50	22,0	254,4	0,00	0,0	0,00
2	600,1	40	33,0	467,9	0,15	11,3	2,40
2	600,0	30	37,8	708,4	0,23	26,7	3,77
2	600,8	20	46,9	1298,9	0,39	76,8	5,92
2	600,8	15	55,8	2027,4	0,55	150,7	7,43
2	600,4	10	74,3	3908,9	0,86	370,7	9,48
2	600,2	8	87,6	5613,0	1,08	578,9	10,31
2	600,6	6	110,0	8994,3	1,43	1015,3	11,29
2	600,2	4	148,8	16792,1	2,05	2097,2	12,49
2	600,9	3	173,0	24675,6	2,45	2998,8	12,15
2	600,3	2	208,7	40863,5	3,09	4774,1	11,68
3	600,0	50	22,1	255,4	0,00	0,0	0,00
3	601,0	40	33,1	469,9	0,23	16,9	3,59
3	601,0	30	37,9	711,4	0,35	39,9	5,61
3	600,8	20	47,0	1301,4	0,59	114,1	8,77
3	600,6	15	55,7	2023,4	0,81	220,9	10,92
3	600,2	10	74,4	3912,0	1,28	549,6	14,05
3	600,0	8	87,7	5616,1	1,60	855,5	15,23
3	600,5	6	110,3	9011,5	2,13	1505,2	16,70
3	600,2	4	142,1	16274,0	2,98	2962,1	18,20
3	599,6	3	164,5	23858,0	3,31	3652,0	15,31

R_z [k Ω]	U_{IN} [mV]	R_{IN} [Ω]	U_{IN2} [mV]	P_{IN} [μ W]	U_z [V]	P_z [μ W]	η [%]
5	601,1	50	22,0	254,8	0,00	0,0	0,00
5	601,0	40	33,0	468,6	0,37	27,8	5,94
5	600,9	30	37,8	709,5	0,57	65,9	9,29
5	600,7	20	46,9	1298,7	0,97	189,0	14,55
5	600,5	15	55,8	2026,3	1,36	368,8	18,20
5	600,1	10	74,3	3906,7	2,13	908,2	23,25
5	600,6	8	90,4	5765,3	2,85	1618,8	28,08
5	600,6	7	100,2	7162,9	3,30	2178,0	30,41
10	601,2	50	22,2	257,1	0,00	0,0	0,00
10	601,2	40	33,2	471,4	0,74	55,2	11,71
10	601,0	30	38,1	714,9	1,14	130,9	18,31
10	600,8	20	47,3	1309,0	1,93	373,6	28,54
10	600,6	15	58,8	2123,9	2,96	877,3	41,31
10	600,5	13	65,2	2684,7	3,30	1089,0	40,56
20	601,2	50	22,4	259,3	0,00	0,0	0,00
20	601,1	40	33,4	474,0	1,48	108,8	22,95
20	601,0	30	38,3	718,4	2,28	258,8	36,02
20	600,9	23	46,3	1116,4	3,30	544,5	48,77
50	601,0	50	22,0	254,8	0,00	0,0	0,00
50	600,9	40	35,0	495,2	3,30	217,8	43,99
100	601,0	50	22,0	254,8	0,00	0,0	0,00
100	601,0	43	33,9	447,1	3,30	108,9	24,36